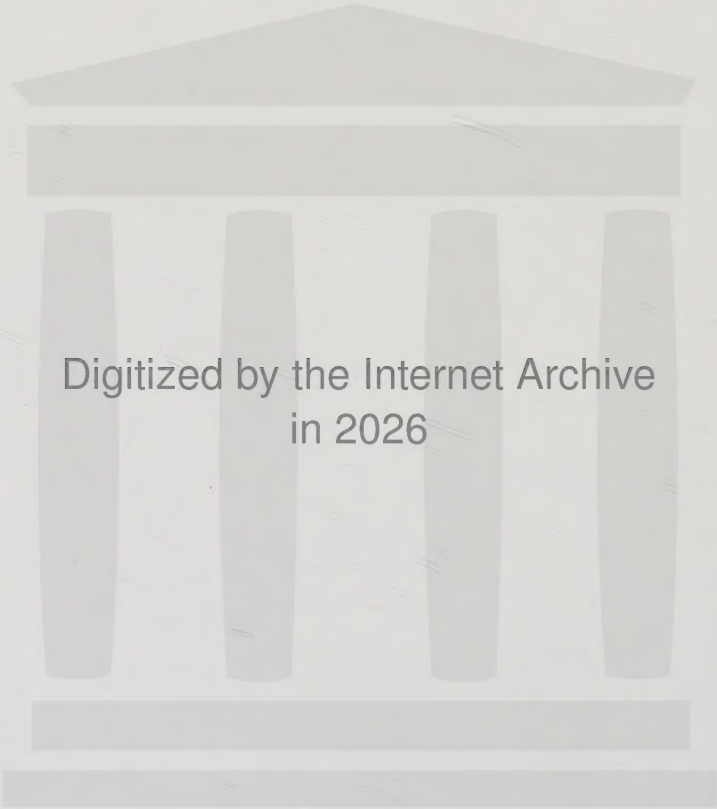
Aus der Abteilung für Zahnärztliche Chirurgie und Parodontologie
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. W. Schulte
des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Universität Tübingen

Das Interferenzverhalten der Taktilität oberer Incisivi – zugleich ein Beitrag zur Neurophysiologie des parodontalen Sensoriums

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde
der Medizinischen Fakultät
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
Tübingen

vorgelegt von
Franz Ackermann
aus Stuttgart

1983


Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547607_0004

Aus der Abteilung für Zahnärztliche Chirurgie und Parodontologie
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. W. Schulte
des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Universität Tübingen

Das Interferenzverhalten der Taktilität oberer Incisivi – zugleich ein Beitrag zur Neurophysiologie des parodontalen Sensoriums

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde
der Medizinischen Fakultät
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
Tübingen

vorgelegt von
Franz Ackermann
aus Stuttgart

1983

Dekan:	Professor Dr. W. Frommhold
1. Berichterstatter:	Professor Dr. W. Schulte
2. Berichterstatter:	Professor Dr. E. Körber

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

REFO-DRUCK HANS VOGLER TÜBINGEN

Meinen Eltern

INHALTSVERZEICHNIS

I. EINLEITUNG S. 1

II. LITERATURÜBERSICHT S. 3

1. Funktionelle Anatomie des Parodontiums
2. Die Nervenversorgung des Parodontiums
3. Zentrale Repräsentation parodontaler Mechanorezeptoren
4. Morphologie der parodontalen Mechanorezeptoren
5. Physiologie der parodontalen Mechanorezeptoren und der sie versorgenden Neurone
6. Untersuchungen zur Funktion parodontaler Mechanorezeptoren beim Menschen

III. PROBLEMSTELLUNG S. 22

IV. EIGENE UNTERSUCHUNGEN S. 23

1. Die Meßanordnung
2. Der federgefesselte Drehschwinger
3. Die elektronische Kraftmessung
4. Fehlerbetrachtung für die elektrische Meßanordnung
5. Vorversuche
6. Versuchsplanung und -durchführung

V. STATISTISCHE VERFAHREN S. 41

VI. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE S. 45

1. Berührschwelle und Druckschwelle
2. Einfluß der Belastung eines Zahnes mit 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN auf die Berühr- und Druckschwelle des nichtbelasteten Nachbarzahnes
3. Einfluß der Belastung von zwei Zähnen mit je 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN auf das Verhalten der Berühr- und Druckschwellen des unbelasteten Nachbarzahnes
4. Einfluß der Belastung eines Zahnes mit 10 mN, 20 mN und 100 mN auf das Verhalten der Berühr- und Druckschwellen des unbelasteten Nachbarzahnes
5. Berührschwelle und Druckschwelle bei größerem Abstand des gemessenen Zahnes vom belasteten Zahn
6. Zeitlicher Verlauf des Schwellenverhaltens nach der Belastung eines Zahnes

VII. DISKUSSION S. 71

VIII. ZUSAMMENFASSUNG S. 85

IX. ANHANG: TABELLEN DER VERSUCHSERGEBNISSE S. 87

X. LITERATURVERZEICHNIS S.154

I. EINLEITUNG

Die Sinnesphysiologie kennt mehrere Arten sensibler Nervenendigungen, die beispielsweise in der Haut als Mechanorezeptoren deren taktile Sensibilität bewirken. Zu ihrer Erregung bedarf es einer mechanischen Deformation der Haut. Die Innervation dieser Rezeptoren erfolgt im Sinne einer Konvergenz-Divergenzschaltung. Das bedeutet zum einen, daß ein Rezeptor von mehreren Nervenfasern innerviert werden, zum anderen, daß eine Nervenfaser mehrere Rezeptoren versorgen kann (50).

Taktile Reize können auch von den Zähnen wahrgenommen werden. Als Träger dieser Fähigkeit wurden Mechanorezeptoren im Parodontium erkannt.

Untersuchungen vieler Autoren an Tier und Mensch dienten dem Ziel, Erkenntnisse über die Anatomie und Physiologie der parodontalen Mechanorezeptoren zu gewinnen. Dabei konnten Gemeinsamkeiten mit den Mechanorezeptoren der Haut festgestellt werden. So ist beispielsweise für die Wahrnehmung von taktilen Reizen die Überschreitung eines Schwellenwertes nötig, wonach zunächst eine Berührungsempfindung auftritt, die bei zunehmender Kraft in eine Druckempfindung übergeht (40, 43). Andererseits zeigen die Versuche von Jenz (43), daß die besonderen Eigenschaften des Parodontiums die Funktion der dort liegenden Mechanorezeptoren erheblich beeinflussen. Seine Ergebnisse machen deutlich, daß Kenntnisse über Mechanorezeptoren anderer Körperregionen nicht ohne weiteres auf die parodontalen Mechanorezeptoren übertragen werden können.

Als deren wichtigste Aufgabe wurde im Zuge ihrer Erforschung erkannt, daß sie im Funktionsgefüge des stomatognathen Systems wesentlich an der reflektorischen Steuerung der Kaumuskelaktivität beteiligt sind (69).

Es wurden schon zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, aber alle Einzelheiten konnten noch nicht geklärt werden. Die vorliegende Arbeit möge dazu beitragen, die Bemühungen um eine Erweiterung der Kenntnisse über die Physiologie der parodontalen Mechanorezeptoren des Menschen ein Stück weiterzubringen.

II. LITERATURÜBERSICHT

1. Funktionelle Anatomie des Parodontiums

Der Begriff Parodontium steht für ein aus vier Komponenten zusammengesetztes, funktionelles System, das Zahn und Kieferknochen miteinander verbindet. Dazu gehören die marginale Gingiva, das Desmodont, der Zahnwurzelzement und die knöcherne Alveole (18, 51, 65, 68).

Auf den Feinbau des Desmodonts soll näher eingegangen werden. Es handelt sich dabei um ein besonders spezialisiertes Bindegewebe, das mit seinen kollagenen Fasern die Verankerung des Zahnes in der Alveole bewerkstelligt. Diese Fasern werden insgesamt als Ligamenta alveolodentales bezeichnet (68). Sie werden entsprechend ihrem Verlauf in sechs Gruppen unterteilt (22, 62, 65):

1) Fibrae dentogingivales, die vom Zahnwurzelzement in die marginale Gingiva und in die Zahnfleischpapillen ziehen.

2) Fibrae interdentales mesiodistales, die nur auf der mesialen und distalen Seite des Zahnes zu finden und im Wurzelzement zweier benachbarter Zähne verankert sind.

3-6) Fibrae alveolodentales. Sie werden aufgeteilt in

3) Fibrae alveolodentales obliquae superiores, die vom Limbus alveolaris schräg nach oben zum cervikalen Wurzelzement verlaufen.

4) Fibrae alveolodentales transversae, die unterhalb der Fibrae alveolodentales obliquae superiores den Wurzelzement und die Alveolenkompakta in horizontalem Verlauf verbinden.

5) Fibrae alveolodentales obliquae inferiores, die die größte Gruppe des Faserapparates bilden und von der Alveolenwand schräg nach unten ziehen.

6) Fibrae apicales, die im apikalen Wurzelzement und in der Knochenkompakta des Alveolenfundus verankert sind.

Die kollagenen Fasern des Faserapparates verlaufen nach Permar (62) vom Zahnwurzelzement zur Knochenkompakta nicht durchgehend. Die im Wurzelzement verankerten Fasern bilden mit den in der Knochenkompakta verankerten den sogenannten intermediären Plexus. Nach der Auffassung von Scott und Simons (72) existiert dieser Plexus nur bis zur Einstellung des Zahnes in die Okklusionsebene und verschwindet dann, so daß die Fasern einen durchgehenden Verlauf zeigen.

Wenn ein Zahn nicht belastet ist, sind die Fasern des Desmodonts entspannt und leicht gewellt. Steht er jedoch in Funktion, werden sie gestreckt und verhindern eine Intrusion des Zahnes in die Alveole (62, 72).

Die weiteren Bestandteile des Desmodonts befinden sich, eingebettet in ein lockeres, mesenchymales Bindegewebe, in den Spalträumen zwischen den Faserzügen (65). Fibroblasten liegen parallel zu den kollagenen Fasern. Daneben vorkommende Zellen sind Osteoblasten und Osteoklasten sowie Zementoblasten und Zementoklasten (62, 72). Nach Rohen (65) enthält das parodontale Bindegewebe zahlreiche, un-

differenzierte Zellen, die sich nach Bedarf zu Fibroblasten, Osteoblasten und Osteoklasten differenzieren können.

Die Blutgefäße des Parodontiums bilden ein Netzwerk, dessen arterieller Zustrom vom Alveolenfundus und von der Gingiva her sowie aus dem Alveolarknochen kommt. Entsprechend erfolgt der venöse Abfluß (62, 72). Die Lymphgefäße kommen aus der Gingiva und verlaufen parallel zu den Blutgefäßen zur Wurzelspitze.

Überbleibsel der Hertwig'schen Epithelscheide werden als Malassez'sche Epithelreste bezeichnet und finden sich ebenfalls im Parodontium.

Neben den kollagenen Fasern wird der Grundsubstanz, der Gewebsflüssigkeit und den Blutgefäßen des Parodontiums in ihrer Gesamtheit eine gewisse Bedeutung beim Auffangen von Okklusionsstößen durch hydraulische Dämpfung beigemessen (43, 72).

Auf die Nervenversorgung des Parodontiums wird im folgenden näher eingegangen.

2. Die Nervenversorgung des Parodontiums

Bernick und Levy (10) konnten bei Affen im Parodontium noch nicht durchgebrochener Zähne keine sensiblen Nerven finden. Sie sahen nur feine, marklose Nervenfasern in enger Beziehung zu Blutgefäßen und nahmen an, daß es sich um autonome

Nerven handelte. Sie folgerten aus ihren Untersuchungen, daß Zahndurchtritt und funktioneller Okklusionskontakt den Reiz für die Proliferation von Nerven in das Parodontium darstellen.

Die sensible Innervation des Parodontiums entstammt dem N. trigeminus (18). Wie aus Untersuchungen am Menschen (17, 36, 52, 53, 75, 80), am Affen (10), an der Katze (53) und an der Maus (9) übereinstimmend hervorgeht, erfolgt sie durch Nerven, die vom Alveolenfundus parallel zur Zahnachse in Richtung Zahnhals ziehen. Zu ihnen gesellen sich Nervenstränge, die aus dem Alveolarknochen kommen. Diese gehen von Nerven aus, die im interalveolären Septum zweier benachbarter Zähne verlaufen und Fasern an deren Parodontium sowie an die Interdentalpapille und die bukkale Gingiva abgeben (74). Sie teilen sich nach ihrem Eintritt ins Parodontium in zwei Äste, von denen einer in Richtung Zahnhals der andere zur Wurzelspitze hin zieht (53).

Es gibt Nervenfasern mit großem und solche mit kleinem Durchmesser. Bei ersteren handelt es sich um markhaltige Fasern, letztere sind markhaltig oder marklos (18, 80). Die markhaltigen Fasern haben bestimmte Typen von Endungen, deren Aufgabe es ist, Berührungs- und Druckreize wahrzunehmen. Die marklosen Fasern dienen der Schmerzwahrnehmung und der autonomen Kontrolle der Blutgefäße (36, 80).

Starkie und Stewart (77) fanden bei vier von sechs sezierten menschlichen Unterkiefern, daß sich der N. mandibularis über die Symphyse hinaus auf die Gegenseite erstreckte. Wenn solch eine Überlappung vorkam, dehnte sie sich selten über den mittleren und nie über den seitlichen Schneidezahn der anderen Seite aus. Eine die Kiefermitte übergreifende Innervation der Zähne wurde auch bei Katzen

festgestellt (4, 24). Nach Anderson und Pearl (4) erfaßte diese sowohl im Oberkiefer als auch im Unterkiefer noch den Caninus aber nicht mehr die Prämolaren. Sie schlossen aus ihren Potentialmessungen am N. trigeminus, daß die Dichte der ipsilateralen Innervation größer ist als die der kontralateralen.

3. Zentrale Repräsentation parodontaler Mechanorezeptoren

Die Mechanorezeptoren im Parodontium werden von pseudounipolaren Nervenzellen innerviert, die im Ganglion trigeminale und im Nucleus tractus mesencephalici liegen (2, 7, 13, 44, 47, 57, 63, 65). Die zentralen Fasern der im Ganglion trigeminale gelegenen Zellen gelangen in der Radix sensoria zum Hirnstamm (5, 16, 47). Der Verlauf der zum Nucleus tractus mesencephalici ziehenden Fasern ist noch nicht eindeutig geklärt. Sie sollen teilweise mit der Radix motoria, teilweise mit der Radix sensoria den Hirnstamm erreichen (5, 16, 18, 47). Die Fasern der Radix sensoria enden im Nucleus sensorius principalis n. trigemini und im Nucleus tractus spinalis n. trigemini (2, 16, 18, 20, 21, 49), der unterteilt wird in Nucleus oralis, Nucleus interpolaris und Nucleus caudalis (16, 18).

Vom Nucleus sensorius principalis n. trigemini zieht der größte Teil des zweiten Neurons im Lemniscus trigeminalis zum kontralateralen Nucleus ventralis posteromedialis des Thalamus. Einige Fasern gehen zum entsprechenden, ipsilateralen Kern. Der Nucleus oralis entsendet nur Fasern über den Lemniscus trigeminalis zum kontralateralen Nucleus ventralis posteromedialis (16, 18). Dasselbe gilt für den

Nucleus interpolaris, von dem auch Fasern zum Kleinhirn verlaufen (16). Vom Nucleus caudalis geht das zweite Neuron bilateral zum Nucleus ventralis posteromedialis, Nucleus posterior, Corpus geniculatum mediale und zu den Nuclei intralaminares (16, 18). Verbindungen der genannten sensorischen Kerne des Trigeminus bestehen auch zur Formatio reticularis des Hirnstamms (16, 18, 38), zum Hypothalamus (18) und zum motorischen Trigeminuskern (38). Die zentralen Fortsätze der im Nucleus tractus mesencephalici gelegenen, parodontalen Nervenzellen ziehen zum Nucleus motorius n. trigemini, zu den anderen, sensorischen Trigeminuskernen, zum Kleinhirn, zum Nucleus n. hypoglossi und zur Ansa cervicalis (16, 18).

Kenntnisse über das dritte Neuron resultieren insbesondere aus Untersuchungen an der Katze. Hassler und Muhs-Clement (39) konnten bei diesem Tier die gleichen Rindenfelder nachweisen, die von anderen Autoren beim Menschen festgestellt worden waren. Sie meinen deshalb, daß damit die Möglichkeit eröffnet wird, aus physiologischen Befunden am Katzencortex Rückschlüsse auf die funktionelle Organisation des menschlichen Cortex ziehen zu können. Darian-Smith (15) stellte fest, daß alle drei somatosensorischen Projektionsfelder (S I, S II und S III) eine direkte Verbindung mit dem Thalamus, der Schaltstation vom zweiten auf das dritte Neuron, haben. Charakteristische Unterschiede in den statisch-funktionellen Eigenschaften wurden bei den isolierten Zellen dieser Regionen nicht gefunden. Mögliche dynamisch-funktionelle Unterschiede waren noch nicht ausreichend erforscht. Die Bedeutung der dreifachen Projektion konnte er nicht erklären. Lund und Sessle (59) untersuchten folgende Regionen:

die Area sensibilis I, die Gyri coronalis und sigmoideus lateralis sowie die Gyri praesylvius und orbitalis. In allen diesen Gebieten fanden sie Neurone, die auf Zahnberührung antworteten.

Die Detailfragen der cortikalen Repräsentation sind bei weitem noch nicht geklärt. Die bisher übliche Trennung in rein sensorische und rein motorische Rindenfelder kann nicht mehr aufrecht erhalten werden, da es bedeutende Überschneidungen gibt (81). Daher ist eine neue Darstellung der cortikalen Projektionsverhältnisse erforderlich. Auf nähere Einzelheiten kann im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden.

4. Morphologie der parodontalen Mechanorezeptoren

Der Grundstein zur Erforschung der parodontalen Mechanorezeptoren wurde durch die Arbeiten von Berkelbach van der Sprenkel (9) sowie Lewinsky und Stewart (52, 53) gelegt, die an Mäusen beziehungsweise an extrahierten, menschlichen Zähnen, an Katzen und Kaninchen arbeiteten. Lewinsky und Stewart (53) äußerten die Vermutung, daß sich die Nervenendigungen im Parodont verschiedener Säugetiere deutlich unterscheiden. Auf diese Artunterschiede wiesen auch Byers und Holland hin (13). Sie rieten zu grosser Vorsicht bei dem Versuch, die Funktion bei einer Spezies mit der anatomischen Struktur bei einer anderen in Verbindung zu bringen. Ähnliche Vorbehalte machte auch Darian-Smith (16).

Ausführliche Untersuchungen über die Rezeptoren im menschlichen Parodontium führten Griffin und Harris durch (27,

28, 37, 38). Sie beschrieben vier Formen der Endung parodontaler Nerven:

a) Freie Nervenendungen. Sie kommen bei markhaltigen Fasern der Gruppe III oder bei Fasern der Gruppe IV vor.

b) Einfache Mechanorezeptoren, die aus einer markhaltigen Nervenfaser bestehen, welche von den Zellkörpern und Fortsätzen von Kapselzellen umgeben ist. Sie verliert im distalen Teil des Rezeptors ihre Markscheide und teilt sich in zahlreiche marklose Fasern auf. Diese enden entweder in Ausbuchtungen der Schwann'schen Zellen ("Hohlraumendungen") oder vom Endoneurium nur durch eine Basallamina getrennt ("offene Endungen"). Der einfache Mechanorezeptor hat eine Größe von etwa 10 µm x 10 µm und ist von lockerem Bindegewebe eingehüllt, dessen Ausdehnung ungefähr der Größe des Rezeptors entspricht. Er dürfte mit den von Lewinsky und Stewart beschriebenen Endknöpfen übereinstimmen.

c) Zusammengesetzte Mechanorezeptoren. Diese ebenfalls mit einer Kapsel versehenen Rezeptoren entstehen aus markhaltigen Nervenfasern, die sich in drei oder mehr Äste aufteilen. Die Äste verlieren nacheinander ihre Markscheide, wobei die dann marklosen Fasern sich um benachbarte markhaltige Fasern herumwinden. Im distalen Teil der Rezeptoren gibt es nur große und kleine marklose Nervenfasern. Diese enden als "Hohlraumendungen" oder als "offene Endungen". Der zusammengesetzte Mechanorezeptor hat eine Größe von etwa 35 µm x 45 µm. Er ist im Gegensatz zum einfachen Mechanorezeptor eng mit dem ihn umgebenden, dichten Bindegewebe verbunden.

d) Mechanorezeptorenkomplexe. Sie bestehen aus mehreren zusammengesetzten Mechanorezeptoren und haben eine Größe von etwa 100 µm x 150 µm. Sie und die zusammengesetzten Mechanorezeptoren dürften den Endringen entsprechen, die Berkelbach van der Sprenkel beschrieben hat.

Die Blutversorgung der einfachen Mechanorezeptoren erfolgt durch Diffusion (29). Die zusammengesetzten Rezeptoren und die Rezeptorenkomplexe haben eine direkte Versorgung durch eine Metarteriole.

5. Physiologie der parodontalen Mechanorezeptoren und der sie versorgenden Neurone

Wenn von parodontalen Rezeptoren gesprochen wird, so muß nach Anderson (1) berücksichtigt werden, daß aus den bisherigen Forschungsberichten nicht geschlossen werden kann, es handle sich bei den histologischen und elektrophysiologischen Untersuchungen um dieselben Endungen. Der Begriff "parodontal" muß nach seiner Ansicht das Desmodont und den Alveolarknochen einschließen. Dies deutet auf die unter 1. (s. S. 3) gegebene Definition von "Parodontium" hin. Dubner, Sessle und Storey (18) weisen auf die Möglichkeit hin, daß bei den Ableitungen einzelner Nerveneinheiten eventuell auch Antworten von Rezeptoren außerhalb des Parodontiums, beispielsweise in der Gingiva, dem Alveolarknochen und dem Periost aufgezeichnet wurden. Hannam (34) hält es für möglich, daß schnell adaptierende Rezeptoren auch im Alveolarperiost

liegen können. Er weist darauf hin, daß es aus funktioneller Sicht kaum eine Rolle spielt, wo sich ein Rezeptor befindet, so lange er auf eine Zahnbewegung reagiert.

Da die Erregung von parodontalen Mechanorezeptoren normalerweise der Vermittlung eines Zahnes bedarf, ist es nicht möglich, die tatsächlichen Reaktionsmechanismen dieser Rezeptoren aufzuklären (18). Dies gilt unter anderem für die Art der Übersetzung von mechanischer Energie in Nervenerregung und für die Frage, ob es sich um Druck- oder um Dehnungsrezeptoren handelt.

Van Steenberghe und de Vries (78) machten die Beobachtung, daß bei halblogarithmischer Darstellung eine lineare Beziehung zwischen dem Betrag der Zahnintrusion und der Anstiegsgeschwindigkeit einer auf den Zahn ausgeübten Kraft sowie zwischen der Kraftanstiegsgeschwindigkeit und der Berührschwelle des Zahnes besteht. Sie führten dies auf die visko-elastischen Eigenschaften des Parodontalgewebes zurück. Da in einem solchen Gewebe bei schneller Kraftänderung ein rascherer Druckanstieg als bei langsam steigender Kraft erfolgt, nahmen sie an, daß die parodontalen Mechanorezeptoren drucksensibel sind.

Es können also aufgrund neurophysiologischer und psychophysikalischer Untersuchungen nur bestimmte Eigenschaften und Reaktionsweisen parodontaler Mechanorezeptoren beschrieben werden. Eine umfassende Klärung der Funktionsmechanismen steht noch aus.

Die Grundaufgabe aller Rezeptorzellen ist die Übersetzung eines äußeren Reizes in die körpereigene Form der Erregung.

Dieser Vorgang wird als Codierung oder Verschlüsselung bezeichnet und ergibt eine Folge von Aktionspotentialen im angeschlossenen Neuriten. Der Transport von Information im Nervensystem besteht entsprechend aus einer Folge von Codierungs-, Decodierungs- und Recodierungsprozessen (50).

Zahlreiche neurophysiologische Untersuchungen an verschiedenen Tierspezies erbrachten Erkenntnisse über die Funktion parodontaler Mechanorezeptoren. Sie führten zu einer Einteilung der Rezeptoren nach ihrem Adaptationsverhalten. Es werden schnell und langsam adaptierende Mechanorezeptoren unterschieden, zwischen denen es Übergangsformen gibt (7, 31, 33, 34, 44, 49, 57, 67). Die zugehörigen Neurone der langsam adaptierenden Rezeptoren liegen bevorzugt im Ganglion trigeminale, während die der schnell adaptierenden vorwiegend im Nucleus tractus mesencephalici zu finden sind (7, 44).

Hannam berichtet von Untersuchungen an Hunden (31), wo er einen Teil schnell und einen Teil langsam adaptierende Einheiten fand. Die übrigen zeigten unterschiedliche Schnelligkeitsgrade der Adaptation. Bei den schnell adaptierenden Einheiten stellte er fest, daß eine bestimmte Belastung des Zahnes notwendig war, um ein Signal zu erhalten. Mit zunehmender Belastung sank die Latenzzeit der Rezeptorantwort. Die langsam adaptierenden Einheiten zeigten eine niedrige Reizschwelle mit kurzer Latenzzeit und eine geringe Sensibilität für dynamische Kräfte. Hannam schließt aus seinen Beobachtungen, daß die langsam adaptierenden Einheiten elastisch, die schnell adaptierenden viskös an den Reiz gekoppelt sind. Das Ausmaß der elastischen beziehungsweise

viskösen Kopplung an den Reiz erklärt dann die Zwischenstufen im Adaptationsverhalten der Rezeptoren. Diese Ansicht wird durch die Versuche von Catton und Petoe bestärkt (14).

Bei den langsam adaptierenden Einheiten fand Hannam auch solche, die Spontanaktivität zeigten (31, 32). Diese kann pulssynchron oder vom Puls unabhängig sein. Er führte sie zunächst auf eine ständige mechanische Deformation der Rezeptoren im Parodontalgewebe zurück. In einer neueren Arbeit meint er jedoch, es sei nach wie vor nicht geklärt, ob Spontanaktivität eine selbständige Rezeptoreigenschaft oder eine Folge der Eigenschaften des umgebenden Gewebes ist (34). Für die bei einigen Einheiten beobachtete, pulssynchrone Spontanaktivität zieht er als mögliche Erklärung die Pulsation eines nahegelegenen Blutgefäßes heran (32). Anderson hält die Spontanaktivität nicht für eine selbständige Eigenschaft des Rezeptors, sondern schreibt sie seiner Umgebung zu (1). Griffin und Spain halten es für möglich, daß die in die Kapsel von Mechanorezeptoren eintretenden Blutgefäße die von Hannam beobachtete, pulssynchrone Spontanaktivität verursachen (29).

Nach Hannam (34) weist die offensichtlich höhere Schwelle der schnell adaptierenden Einheiten auf die Möglichkeit hin, daß diese nicht im Parodontium sondern im Alveolarperiost liegen. Dann könnte eine stärkere mechanische Reizung des Zahnes erforderlich sein, um diese Rezeptoren zu erregen, als für eine Erregung der tatsächlich im Parodontium liegenden, langsam adaptierenden Einheiten nötig ist.

Aufgrund der neurophysiologischen Untersuchungen konnte auch folgende Unterscheidung gemacht werden. Es gibt Neurone, die nur auf mechanische Reizung eines Zahnes antworten, und es gibt solche, die mehrere Zähne innervieren (7, 21, 33, 44, 49, 57, 67). Letztere können zusätzlich an der Innervation der benachbarten Weichgewebe beteiligt sein.

Ein weiteres Merkmal der parodontalen Neurone ist die Richtungsempfindlichkeit. Es wurden Einheiten gefunden, die nur durch Druck auf eine Facette des Zahnes gereizt werden konnten. Andere antworteten auf Reizung aus zwei, drei, vier oder allen fünf möglichen Richtungen (33, 44, 49, 67). Es gibt jeweils eine Richtung, in der Schwelle und Latenzzeit am geringsten sind (44, 49, 67). Der Zahn als Ganzes weist keine bevorzugte Reizrichtung auf (44).

Yamada und Kumano (82) stellten bei ihren Untersuchungen an Hunden fest, daß die kleinste Zahnlageveränderung, die eine Nervenerregung hervorrief, 2-3 µm betrug. Dies war unabhängig von der unterschiedlichen Kraft, die an verschiedenen Zähnen nötig war, um die genannte Lageveränderung zu erreichen.

Hilton (41) berichtet, daß es nach kurzer Belastung eines Zahnes mit 60 g zwei Minuten dauerte, bis der Zahn in seine ursprüngliche Lage zurückgekehrt war. Erst dann konnte von den Mechanorezeptoren wieder eine maximale Antwort auf erneute Belastung erhalten werden. Er führt dieses Phänomen darauf zurück, daß die Wiederherstellung mechanischer Eigenschaften des Parodontalgewebes eine entsprechende Zeitspanne erfordert.

Linden (56, 57) fand bei Aufzeichnungen von Neuronenaktivitäten im Nucleus tractus mesencephalici der Katze eine neue Gruppe intraoraler Mechanorezeptoren, die er "Typ P" nannte. Die Neurone feuerten nach elektrischer Reizung des gleichseitigen N. palatinus, nach Druck auf alle Oberkieferzähne, auf die Nase und den harten Gaumen. Die Entladungsfrequenz war bei Reizung der ipsilateralen Zähne größer als bei den kontralateralen. Die Lage der "Typ P"-Rezeptoren ist noch unbekannt. Linden hält es für möglich, daß sie in der Sutura palatomaxillaris liegen.

Die parodontalen Neurone in den sensorischen Kernen des N. trigeminus antworten nur auf Reizung ipsilateraler Zähne (16, 18, 21, 49). Bereits auf dieser Stufe der zentralen Repräsentation kommt es zur Konvergenz. Sie konnte von mehreren Zähnen, manchmal von allen Zähnen einer Kieferhälfte oder sogar von Ober- und Unterkieferzähnen festgestellt werden (21). Es wurden auch Neurone gefunden, die nicht nur auf parodontale Reize, sondern auch auf Reize ausgehend von der Pulpa, anderen oralen Geweben oder dem Gesicht antworteten (18).

Die Neurone in diesen Kernen haben ähnliche statisch-funktionelle Eigenschaften (16). Die dynamisch-funktionellen Eigenschaften stimmen jedoch nicht überein. Es wurden Unterschiede insbesondere zwischen den Nuclei sensorius principalis und oralis auf der einen und dem Nucleus caudalis auf der anderen Seite gefunden.

Im Thalamus kommt es zur Konvergenz von Informationen aus beiden Gesichtshälften (16).

In der Area sensibilis I des Cortex der Katze fanden Lund und Sessle (59) eine mittlere Zahl von 1,4 Eingängen je Neuron, wobei zehn Prozent der Neurone bis zu drei Eingänge aufwiesen. Das rezeptive Feld war auf die kontralaterale Gesichtshälfte beschränkt. Es schloß neben den Zähnen stets die Mundschleimhaut und häufig Teile des Gesichts ein. In wenigen Fällen wurden noch weitere Eingänge, zum Beispiel vom Musculus masseter, festgestellt.

Beim sensorischen Projektionsfeld II konnte bilaterale Konvergenz beobachtet werden. Das rezeptive Feld umfaßte das Gesicht und den Mund. Auch hier zeigten einige Neurone ein größeres, rezeptives Feld, das bei einem die gesamte Körperoberfläche einschloß. Die mittlere Zahl der Eingänge je Neuron betrug 2,5. Siebenundzwanzig Prozent der Neurone hatten mehr als drei Eingänge.

Das sensorische Projektionsfeld III hatte eine mittlere Zahl der Eingänge von 3,6. Siebzig Prozent der Neurone antworteten auf mehr als drei, dreißig Prozent auf mindestens fünf Eingänge. Das rezeptive Feld war ebenfalls bilateral angelegt und schloß Teile des Körpers, zum Beispiel die Pfoten, oder den gesamten Körper ein.

Die Aktivität parodontaler Neurone unterliegt verschiedenen modifizierenden Einflüssen. So kann die mechanische Reizung benachbarter Gebiete, die sich häufig bis auf die andere Gesichtshälfte erstrecken, eine hemmende Wirkung haben (16). Hemmung konnte auch durch Reizung der Substantia grisea centralis und des Cortex bewirkt werden, wobei der Einfluß auf nociceptive Eingänge deutlicher als auf nicht nociceptive Eingänge war (73). Der Sympathikus verursacht ebenfalls eine Hemmung (3).

Die Erregung der parodontalen Mechanorezeptoren greift vielseitig in das Geschehen im stomatognathen System ein. Die Aufgabe dieser Rezeptoren liegt insbesondere in einer Beteiligung an der Steuerung der Unterkieferbewegung und der damit verbundenen, mastikatorischen Reflexe (9, 18, 25, 42, 48, 61, 70). An letzteren ist neben den beschriebenen, sensorischen Kernen und dem motorischen Kern des N. trigeminus der Nucleus supratrigeminalis als Schaltstation beteiligt (45). Die schnell adaptierenden Mechanorezeptoren sollen den Kieferöffnungsreflex vermitteln (27, 38). Weiter wurde festgestellt, daß eine mechanische Reizung von Zähnen auch den Kieferschließreflex auszulösen vermag (18). Die Funktion der langsam adaptierenden und spontan aktiven Einheiten besteht wahrscheinlich darin, die Motoneuronen des Trigeminus auf einem bestimmten Erregungsniveau zu halten, so lange die Kiefer sich in der Ruhelage befinden. Während der Unterkieferbewegung sind sie dann an der Kontrolle der okklusalen Lage des Unterkiefers beteiligt (38, 48). Die parodontalen Mechanorezeptoren üben ferner einen Einfluß auf die Zungenmuskulatur aus (18). Schließlich wird angenommen, daß ihnen auch eine Bedeutung bei der Umstellung des Schluckmodus vom viszeralen Schlucken des Säuglings zum somatischen Schlucken des Erwachsenen zukommt (61).

6. Untersuchungen zur Funktion parodontaler Mechanorezeptoren beim Menschen

Verschiedene Autoren haben versucht, genaue Angaben über die Berührschwelle menschlicher Zähne zu machen (55, 58,

76). Jenz (43) weist auf die große Spanne der von ihm ermittelten Werte hin und hält es daher nicht für sinnvoll, einen repräsentativen Mittelwert zu errechnen. Auch van Steenberghe und de Vries (78) stellen fest, daß es keine präzise Schwelle gibt, sondern einen Bereich, in dem die Schwelle liegt. Loewenstein und Rathkamp (58) berichten von einer signifikanten Erhöhung der Schwelle bei devitalen Zähnen. Dies wird von den meisten anderen Autoren nicht bestätigt, die für vitale und devitale Zähne ähnliche Werte erhielten (40, 42, 55, 76).

Edel und Wills (19) stellten fest, daß eine bis zu sechzigprozentige Zerstörung des Zahnhalteapparates die Fähigkeit, axiale Kräfte im Schwellenbereich wahrzunehmen, nicht beeinflußt. Ähnliche Beobachtungen machten auch Byers und Holland bei Ratten (13).

Bonaguro, Dusza und Bowman zeigten, daß die Oberkieferschneidezähne Unterschiede zwischen schwachen Kräften am besten erkennen können (11). Der optimale Funktionsbereich der Oberkiefereckzähne liegt zwar bei einem höheren Wert, sie konnten aber die kleinste, relative Differenz zwischen zwei Kräften wahrnehmen. Der Bereich, in dem Kräfte von möglichst geringem Unterschied besonders gut erkannt werden, liegt nach Bowman und Nakfoor zwischen 50 g und 500 g (12). Dazu meint Hannam (34), daß angesichts der niedrigen Schwelle menschlicher Schneidezähne, die in der Größenordnung von 1 g oder weniger liegt, ein komplizierter Mechanismus der sensorischen Übermittlung vorliegen muß. Es ist nach seiner Meinung möglich, daß die komplizierte Organisation der rezeptiven Felder und die unterschiedlichen Richtungsempfindlichkeiten der parodontalen Mechanorezeptoren bei geringen Reiz-

intensitäten zu konkurrierenden Impulsen im Zentralnervensystem führen, und daß die zentralen Synapsen daher erst bei Reizstärken über 50 g zu einer genauen Reizunterscheidung fähig sind.

Hannam und Farnsworth (35) stellten bei der Katze fest, daß am meisten neuronale Aktivität im unteren Bereich der möglichen Kaukräfte zu finden ist. Deshalb soll die Fähigkeit, Kraftgrößen zu unterscheiden und diese Information zur Koordination der Muskelaktivität zu nutzen, in diesem Bereich am genauesten sein. Sie sind der Meinung, daß sowohl bei der Katze als auch beim Menschen der afferente Impulsstrom von den Mechanorezeptoren die Fähigkeiten des Zentralnervensystems, diese Angaben wahrzunehmen, weit übersteigt.

Aufzeichnungen der neuronalen Aktivität im N. mandibularis mit Mikroelektroden wurden von Johansson und Olsson am Menschen durchgeführt (46). Zwei von sieben untersuchten Neuronen waren langsam adaptierende, jeweils einen Zahn versorgende Einheiten, die auf mechanische Reizung des Eckzahnes beziehungsweise des ersten Prämolaren antworteten. Sie waren richtungssensibel und reagierten kaum auf die dynamische Komponente eines Reizes. Die ausgelöste Impulsfrequenz war abhängig von der Stärke der angewandten Kraft. Das zum Prämolaren gehörende Neuron zeigte Spontanaktivität. Die Autoren kamen aufgrund ihrer Belastungsmessungen zu dem Schluß, daß die von ihnen untersuchten, mechanosensiblen, parodontalen Einheiten am meisten Information bei Kräften unter einem Newton vermitteln.

Von Skramlik berichtet (76), daß Hassenstein auf seine Anregung hin die Fähigkeit der Lokalisation von Druckreizen

an Zähnen untersuchte. Er kam zu dem Ergebnis, daß um so mehr falsche Angaben gemacht wurden, je weiter der belastete Zahn von der Medianebene entfernt war. Häufig wurde der benachbarte Zahn als Reizort angegeben. Starke machte ebenfalls auf Anregung von Skramliks Versuche zur Bestimmung der Raumschwelle. Er stellte fest, daß zwei Druckreizorte am besten unterschieden werden konnten, wenn symmetrisch zur Medianebene liegende Zähne belastet wurden. Die Unterscheidung ist auch bei benachbarten Zähnen auf einer Kieferhälfte möglich. Sie wird wieder um so schwieriger, je weiter die Zähne von der Medianebene entfernt sind.

III. PROBLEMSTELLUNG

Einige Autoren haben bei neurophysiologischen Untersuchungen festgestellt, daß sensorische Neuronen mehrere benachbarte Zähne innervieren können (7, 21, 33, 44, 49, 67). Dies gibt Anlaß zu der Vermutung, daß die sensorischen Eigenschaften zweier gereizter Zähne gegenseitigen Einflüssen unterliegen.

Die mögliche Beeinflussung der Tastempfindlichkeit eines Zahnes durch Kraftreize auf benachbarte Zähne wird in der vorliegenden Arbeit untersucht.

IV. EIGENE UNTERSUCHUNGEN

1. Die Meßanordnung

Bei der Bestimmung der Berührschwelle von Zähnen kamen verschiedene Verfahren der Kraftübertragung auf den Zahn und der Messung der ausgeübten Kraft zur Anwendung.

Von Skramlik (76) benutzte auf bestimmte Kraftwerte geeichte, von Frey'sche Reizhaare. Ein sogenanntes Federästhesiometer, bei dem die Kraft von einer Spiralfeder erzeugt und mit einem Hebelarm übertragen wurde, diente Loewenstein und Rathkamp (58) für ihre Messungen. Ebenfalls über einen Hebelarm gelangte die Kraft bei der von Bowman und Nakfoor (12) angewandten Meßanordnung an den Zahn. Hier erfolgte die Kraftmessung mit einem Drehmomentschlüssel. Mit dem gleichen Gerät arbeiteten Bonaguro, Dusza und Bowman (11). Edel und Wills (19) benutzten zur Kraftübertragung einen Hebelarm, der von einer Magnetspule bewegt wurde. Zur Messung der Kraft dienten Dehnmeßstreifen. Van Steenberghe und de Vries konstruierten eine Versuchsanordnung, bei der ein auf einer Gummimembran befestigtes Stahlröhrchen die Kraft auf den Zahn übertrug, die durch elektronisch vorprogrammierbaren Luftdruck reguliert werden konnte (78).

Die vorliegenden Untersuchungen wurden mit einer Meßanordnung durchgeführt, die von L. Mühlbradt entworfen worden war, und deren jetzige Form in Zusammenarbeit mit D. Lukas und K.-P. Jenz entstand. Bei der Entwicklung dieser Vorrichtung waren folgende Bedingungen zu erfüllen:

Die gesamte Meßanordnung mußte einfach zu bedienen sein. Der Proband sollte durch die Kraftübertragungs- und Kraftmeßelemente möglichst wenig irritiert werden. Ferner wurde gefordert, daß der Meßfühler prellfrei auf den Zahn aufgesetzt werden kann. Der Meßvorgang sollte keiner Beeinflussung durch physiologische Bewegungen des Kopfes, die durch den Pulsschlag und die Atmung verursacht werden, unterliegen. Eine weitere Bedingung war, die Kraftanstiegsgeschwindigkeit variabel einstellen und dann konstant halten zu können. Die Kraftmessung mittels elektronischer Elemente war ebenfalls eine zu beachtende Forderung.

Bei der unter Berücksichtigung der genannten Gesichtspunkte konstruierten Meßanordnung handelt es sich um die Kombination eines federgefesselten Drehschwingers mit einem elektronischen Kraftfühler.

2. Der federgefesselte Drehschwinger

Ein einarmiger Waagebalken ist kugelgelagert an einem Stativ befestigt. Das Material wurde so gewählt, daß er eine geringe Masse und damit ein geringes Trägheitsmoment aufweist. Sein Eigengewicht wird durch eine am Stativ befestigte Feder ausgeglichen. Dabei handelt es sich um eine lange, weiche Feder, so daß die durch Kopfbewegungen verursachte Änderung der Länge der Feder und damit der Federkraft vernachlässigbar klein ist. Eine solche Konstruktion gewährleistet,

daß der Waagebalken physiologischen Bewegungen des Kopfes nahezu trägheitsfrei folgen kann. Ebenso ermöglicht sie es durch die geringe Rückstellkraft des Meßarms, diesen prellfrei auf den Zahn aufzusetzen, was eine Verfälschung der Meßergebnisse durch einen Kraftstoß beim Aufsetzen verhindert. Am Ende des Waagebalkens ist der Kraftfühler angebracht.

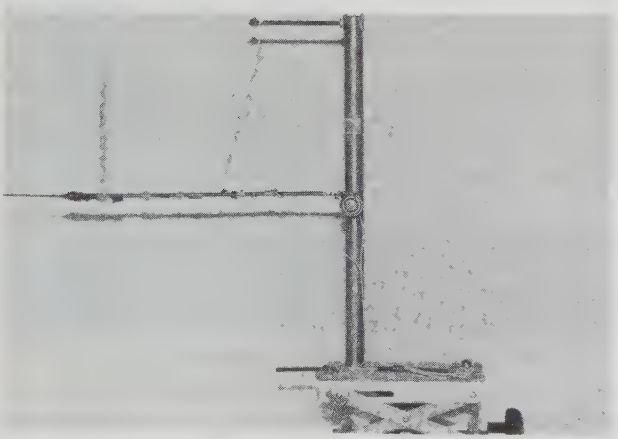


Abb. 1 a: Der federgefesselte Drehschwinger.

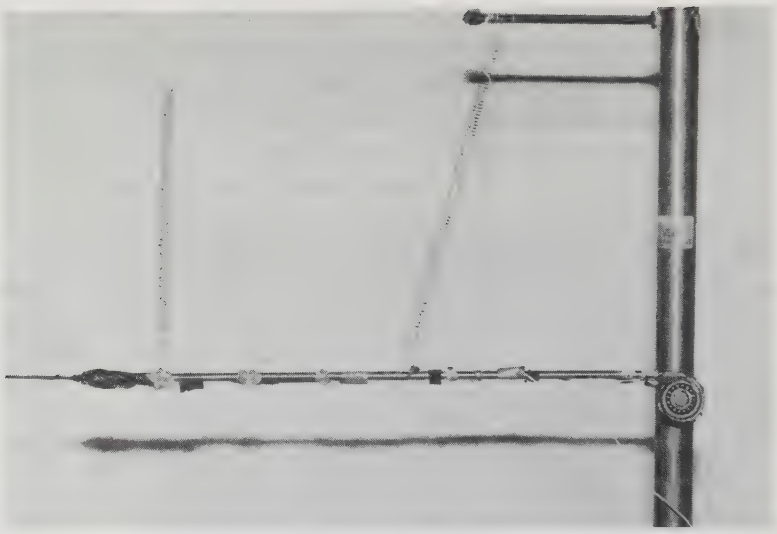


Abb. 1b: Ausschnitt aus Abbildung 1a.
Der kugelgelagerte Waagebalken, an dessen freiem Ende der Kraftfühler angebracht ist.

Das beschriebene Gerät wird einarmiger, federgefesselter Drehschwinger genannt (s. Abb. 1). Er ist auf einem Hebetisch befestigt, so daß er angehoben werden kann, bis der Kraftaufnehmer den Zahn beinahe berührt. Dann wird der Waagebalken von einem über dem Drehschwinger angeordneten Getriebemotor[1] mit einem Faden nach oben gezogen. Er setzt erst auf den Zahn auf, wenn der Getriebemotor konstant läuft. Nun wird der Zahn zunehmend belastet. Durch die konstante Drehfrequenz des Motors ist der Kraftzuwachs am Zahn in der Zeiteinheit konstant. Der Motor wird mit einer regelbaren, konstanten Gleichspannung gespeist. Eine Änderung der Kraftanstiegsgeschwindigkeit wird durch eine Änderung der Drehfrequenz des Motors bewirkt, das heißt durch eine Änderung der anliegenden Spannung.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden zum größten Teil mit einer Kraftanstiegsgeschwindigkeit von 1,8 mN/s durchgeführt. Bei den Messungen an den ersten Oberkieferprämolaren betrug sie 0,75 mN/s.

Ein Trägerfrequenzmeßverstärker dient zur Speisung des Kraftfühlers und zur Verstärkung der Meßwerte. Eine Tarierautomatik sorgt für den Nullabgleich. Die Meßwerte werden durch ein Digitalvoltmeter angezeigt und von einem Linienschreiber aufgezeichnet. Ein Vorschaltgerät zum Schutz der Versuchsperson begrenzt die Spannung am Probanden auf maximal 6 V.

Einen Überblick über die Versuchsanordnung gibt das Blockschaltbild in Abbildung 2.

1 Getriebemotor VG 10, Fa. Zoeller

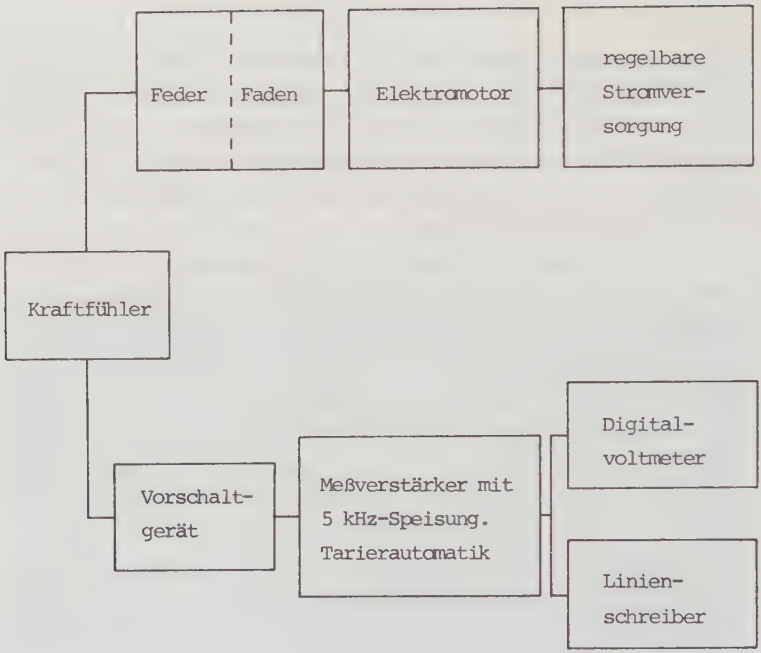


Abb. 2: Blockschaltbild der Versuchsanordnung.

Der mit einer regelbaren Gleichspannung gespeiste Elektromotor zieht den Waagebalken des Drehschwingers nach oben, wodurch der Zahn belastet wird. Der Kraftfühler ist über das Vorschaltgerät mit dem Meßverstärker verbunden, der die verstärkten Signale an das Digitalvoltmeter zur Anzeige und an den Linienschreiber zur Aufzeichnung weitergibt.

3. Die elektronische Kraftmessung

Die Kraftmessung erfolgte bei einem Teil der Versuche mit zwei piezo-resistiven Halbleiterelementen[1], beim anderen Teil wurden zwei Dehnmeßstreifen[2] aus Konstantan-Folie benutzt. Beide Verfahren haben sich bewährt.

Die piezo-resistiven Halbleiterelemente befinden sich am Ende einer ca. 25 mm langen Nadel, die mit Kunststoff überzogen ist, und sind ebenfalls in Kunststoff eingebettet. Dadurch wird der Einfluß des Ausatmens auf die temperaturempfindlichen Meßelemente vermindert. Der Kunststoff verbindet zugleich den Kraftfühler mit dem Waagebalken des Drehschwingers. Die Dehnmeßstreifen sind entsprechend am Ende einer ca. 90 mm langen, stabileren, nicht mit Kunststoff überzogenen Nadel angebracht. Die Temperaturempfindlichkeit ist bei diesen Meßelementen dem Stahl angepaßt. Der Kraftfühler ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

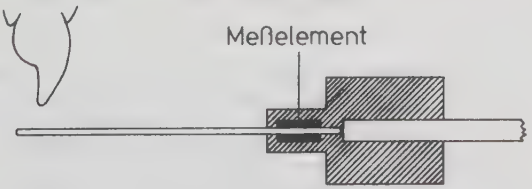


Abb. 3: Schematische Darstellung des Kraftfühlers. Die zwei Meßelemente sind oberhalb und unterhalb der Nadel befestigt. Eine Belastung des Zahnes führt zur Dehnung des oberen und zur Stauchung des unteren Meßelements. Kunststoff schützt die beiden Meßelemente und verbindet sie mit dem Waagebalken des Drehschwingers.

1 Fa. Endevco
2 Typ BLY 41, Fa. Hottinger-Baldwin-Meßtechnik (HBM)

Die Belastung eines Zahnes wird in eine Verbiegung der Nadel umgesetzt, wodurch das obere Fühlerelement gedehnt, das untere gestaucht wird. Dies bewirkt eine Änderung des elektrischen Widerstandes der Meßelemente. Die am Fühler wirksame Kraft wird demnach als Widerstandsänderung gemessen. Dazu werden die Meßelemente in die Anordnung einer Wheatstone'schen Brückenschaltung gebracht (s. Abb. 4).

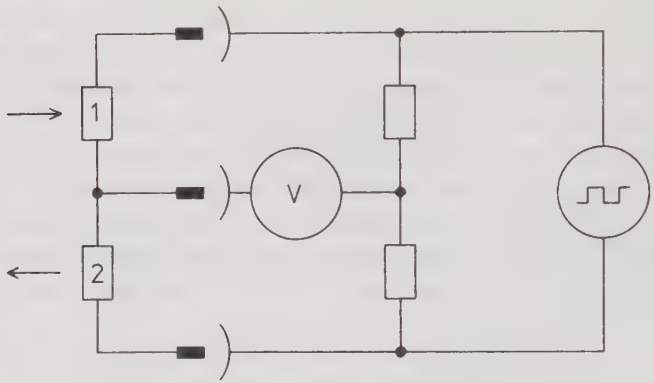


Abb. 4: Schematische Darstellung der Wheatstone'schen Brückenschaltung mit den zwei Fühlerelementen (1 und 2) und zwei Ergänzungswiderständen. Die Halbleiterelemente werden mechanisch gegeneinander verbogen, wodurch sich ihr Widerstand ändert. Die daraus resultierende Spannungsänderung wird gemessen.

Ein Trägerfrequenzmeßverstärker[1] speist die Meßelemente mit einer 5 kHz-Trägerfrequenz. Er liefert die Spannung für die Brückenschaltung und verstärkt die eingehenden

1 MG 3170, Fa. Hottinger-Baldwin-Meßtechnik (HBM)

Signale. Eine Tarierautomatik[1] kann für den automatischen Nullabgleich eingesetzt werden. Durch das Anlegen einer Spannung werden die Widerstandsänderungen der Meßelemente in Spannungsänderungen übersetzt. Die verstärkten Signale können dann gemessen und aufgezeichnet werden. Das Ausgangssignal des Meßverstärkers ist der Belastung des Kraftfühlers proportional. Die ermittelten Meßwerte werden durch ein Digitalvoltmeter[2] angezeigt und von einem Linienschreiber[3,4] (es wurden zwei verschiedene Geräte benutzt) aufgezeichnet.

Der Proband kann die Registrierung der Brückenverstimmung, das heißt des Kraftzuwachses am Zahn, mit einem Taster unterbrechen. Dieser führt den Ausgang des Trägerfrequenzmeßverstärkers auf den Nullwert zurück. Die hierdurch auf dem Schreiber aufgezeichnete Linie gibt den gesuchten Meßwert an (s. Abb. 5, S. 34).

Die VDE-Vorschrift 0750 fordert bestimmte Sicherheitsvorkehrungen für elektrische Messungen direkt am menschlichen Körper und in Körperhöhlen. Aus diesem Grund wird ein Vorschaltgerät[5] eingesetzt. Es begrenzt mit Hilfe zweier Trenntransformatoren und Zenerdioden die effektive Spannung an der Versuchsperson auf maximal 6 V_{eff}.

Bei der geschilderten Meßanordnung beträgt die Obergrenze des linearen Meßbereichs $\pm$ 120 mN für die piezo-resistiven Halbleiterelemente und $\pm$ 2000 mN für die Dehnmeßstreifen.

1 TA 3545, Fa. Hottinger-Baldwin-Meßtechnik (HBM)
2 DVM S 2000 G, Fa. Hartmann und Braun
3 MC 611, Fa. Watanabe
4 Minigor Typ RE 501, Fa. Metrawatt
5 VG 750, Fa. Hottinger-Baldwin-Meßtechnik (HBM)

4. Fehlerbetrachtung für die elektrische Meßanordnung

Es kann nicht festgestellt werden, wie sich die Fehler der einzelnen, hintereinandergeschalteten Teile der Meßanordnung zu einem Gesamtfehler zusammensetzen. Daher ist die ungünstigste Möglichkeit für die Fehlerbetrachtung heranzuziehen. In diesem Fall addieren sich die einzelnen Linearitätsfehler in voller Höhe zum Gesamtfehler.

Es müssen die Linearitätsfehler der Kraftfühler (F_1), des Meßverstärkers (F_2) und des Schreibers (F_3) berücksichtigt werden. Der Fehler des Digitalvoltmeters kann bei der vorliegenden Anwendung vernachlässigt werden. Hieraus resultiert ein Gesamtfehler $F_{ges} = F_1 + F_2 + F_3$.

Der Datenbeschreibung der Geräte können folgende Werte entnommen werden:

Für die piezo-resistiven Halbleiterelemente gilt
$F_{ges} = (\pm\ 1\ \%) + (\pm\ 0{,}15\ \%) + (\pm\ 0{,}3\ \%)$ des Vollausschlags.

Der Gesamtfehler beträgt demnach $F_{ges} = \pm\ 1{,}45\ \%$ des Vollausschlags. Bei den Dehnmeßstreifen ergibt sich ein Gesamtfehler von
$F_{ges} = (\pm\ 0{,}1\ \%) + (\pm\ 0{,}15\ \%) + (\pm\ 0{,}3\ \%)$. Er beträgt also $F_{ges} = \pm\ 0{,}55\ \%$ des Vollausschlags.

Vor jeder Messung wurde die Meßanordnung durch Anhängen eines Gewichtsstückes an die spätere Ansatzstelle der Zähne geeicht.

5. Vorversuche

Um die Versuchsperson mit der Meßmethodik und dem Versuchsablauf vertraut zu machen, werden zunächst einige Probemessungen durchgeführt. Der Proband sitzt aufrecht in einem zahnärztlichen Behandlungsstuhl. Sein Kopf wird durch die Kopflehne gestützt. Dies soll eine axiale Belastung der Zähne ermöglichen.

Die Versuchsperson wird über die Versuche genau unterrichtet und angewiesen, während der Messungen ruhig zu sitzen, um ungewollte Einflüsse auf den Kraftfühler zu vermeiden. Werden zur Messung die piezo-resistiven Halbleiterelemente benutzt, muß sie auch aufgefordert werden, durch die Nase zu atmen, um Irritationen der temperaturempfindlichen Meßelemente möglichst zu reduzieren.

Da die Versuche dem Probanden ein Höchstmaß an Konzentration abverlangen, sind Ablenkungen durch Geräusche oder anderer Art auszuschließen.

Der Kraftfühler wird bei leicht geöffnetem Mund so unter der Mitte der Incisalkante eines Schneidezahnes plaziert, daß er sie gerade noch nicht berührt. Dann zieht der vom Versuchsleiter eingeschaltete Getriebemotor den Waagebalken des Drehschwingers nach oben, wodurch der Zahn zunehmend belastet wird. Der Kraftzuwachs ist auf dem Schreiber ersichtlich.

Jenz (43) stellte fest, daß für die Berührschwelle kein bestimmter Wert angegeben werden kann. Er erkannte vielmehr, daß es sich um ein sensorisches Intervall handelt. Die zunehmende Belastung eines Zahnes verursacht zunächst

ein nicht genau definierbares Empfinden, das bei stärkerer Kraft zu einem deutlichen Druckgefühl wird.

Die Beobachtungen von Jenz konnten von unseren Probanden bestätigt werden. In der vorliegenden Untersuchung wird das Einsetzen der unspezifischen Empfindung als Berührschwelle, der Beginn des Druckgefühls als Druckschwelle bezeichnet.

Die Versuchsperson betätigt beim Auftreten der beiden Schwellen einen Taster, der den Schreiber auf den Nullwert zurückführt. Auf diese Weise werden die zwei Schwellenwerte im Belastungsdiagramm, einer Kraft-Zeit-Kurve, aufgezeichnet (s. Abb. 5).

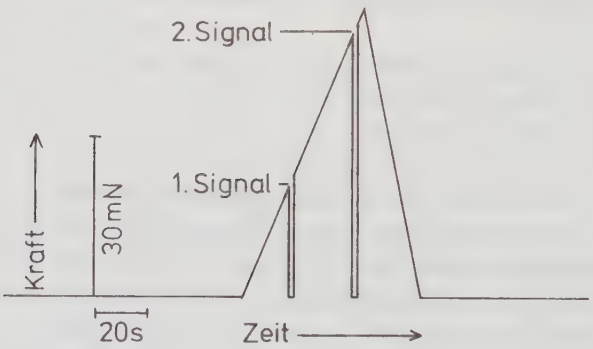


Abb. 5: Beispiel für ein Belastungsdiagramm (Originaldurchzeichnung).
Das erste Signal gibt den Kraftwert der Berührschwelle, das zweite Signal den Kraftwert der Druckschwelle an.

Nach dem zweiten Signal wird der Zahn entlastet, der Schreiber bewegt sich auf die Nullinie zurück. Gegebenenfalls kann nun von der Tarierautomatik Gebrauch gemacht werden. Nach einer kurzen Pause erfolgt die nächste Messung. Eine Meßreihe besteht in der Regel aus zehn Messungen unter gleichen Bedingungen.

6. Versuchsplanung und -durchführung

Ziel dieser Arbeit war es, mögliche Beeinflussungen der Berühr- und Druckschwellen menschlicher Oberkieferzähne durch Belastungen festzustellen, die einmal während einer Messung auf einen oder zwei Nachbarzähne und das andere Mal vor einer Messung auf einen Nachbarzahn oder den zu messenden Zahn wirkten.

Die vorliegenden Untersuchungen erfolgten an den Zähnen 11, 12, 21, 22, 14 und 24. Sie wurden an acht Probanden im Alter zwischen 20 und 25 Jahren durchgeführt. Die klinische Untersuchung der für die Messungen herangezogenen Zähne ergab folgende Befunde:

	Zahn	Füllungen	Zahnfleischtaschen (in mm) mesial	distal	Vitalität
Proband 1: C.R.	11	mesial	1	2	+
	12	mesial und distal	2	2	+
	21	distal	1	2	+
	22	mesial	2	2	+

	Zahn	Füllungen	Zahnfleischtaschen (in mm) mesial	distal	Vitalität
Proband 2: C.H.	11		2	2	+
	12		2	2	+
	21		2	2	+
	22		3	2	+
Proband 3: F.A.	11		2	2	+
	12		2	2	+
	13		2	2	+
	14		2	2	+
	21		2	2	+
	22		2	2	+
	23		2	2	+
	24		2	2	+
Proband 4: A.S.	11	mesial und distal	3	3	+
	12		3	3	+
	21	distal	3	3	+
	22	mesial	3	3	+
Proband 5: P.H.	11	distal	3	3	+
	12	mesial	3	3	+
	21	mesial	3	3	+
	22		3	4	+
Proband 6: I.A.	11	distal (Sekundär-karies)	3	3	+
	12	mesial kariös	2	2	+
	21	mesial	3	3	+
	22	mesial (Sekundär-karies)	3	3	+

	Zahn	Füllungen	Zahnfleischtaschen (in mm) mesial	distal	Vitalität
Proband 7: H.K.	11		2	3	+
	12		3	3	+
	13		3	3	+
	14		3	3	+
	21		3	3	+
	22		3	3	+
	23		3	3	+
	24		3	4	+
Proband 8: M.B.	13		3	2	+
	14		3	2	+
	23		2	2	+
	24		2	2	+

Bei den Probanden 1, 2, 4 und 5 besteht in Schlußokklusion kein Frontzahnkontakt. Proband 3 hat einen Deckbiß, die Zähne 11, 12 und 21 sind abgestützt, 22 hat keinen Kontakt. Die Oberkieferfrontzähne von Proband 6 sind alle abgestützt, 22 steht mit 32 im Kantenbiß. Bei Proband 7 sind nur die mittleren Oberkieferschneidezähne abgestützt.

Eine Meßreihe setzt sich in der Regel aus zehn Einzelmessungen unter gleichen Bedingungen zusammen, wobei nach fünf Messungen eine längere Erholungspause eingelegt wird. Die mit dem gleichen Zahnpaar (gemessener Zahn - belasteter Zahn) an einem Probanden durchgeführten Meßreihen bilden eine Versuchsreihe. Alle an mehreren Versuchspersonen unter gleichen Bedingungen aufgenommenen Versuchsreihen ergeben einen Versuch.

Die Versuche waren sehr umfangreich und zeitaufwendig. Sie wurden mit jeweils drei Probanden durchgeführt.

Die Belastungen der Zähne mit 10 mN[1], 20 mN, 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN erfolgten mit Hilfe eines an einem weiteren Stativ höhenverstellbar befestigten, zweiarmigen Waagebalkens. An dessen einem Ende konnten die benötigten Gewichtstücke angehängt werden, das andere Ende wurde auf die Schneidekante des Zahnes aufgesetzt.

Der erste Versuch diente dem Ziel, den Einfluß der Kräfte 100 mN[1], 200 mN, 500 mN und 1000 mN zu ermitteln. Die Messungen erfolgten an den vier Schneidezähnen. Die Meßpaare (gemessener Zahn - belasteter Zahn) waren so gewählt, daß der gemessene Zahn zusammen mit jedem der drei anderen Zähne untersucht wurde. Dies ergab folgende Paarungen:

gemessener Zahn	belasteter Zahn
12	11
12	21
12	22
11	12
11	21
11	22
21	22
21	11
21	12
22	21
22	11
22	12

1 Zur Belastung wurden in p geeichte Gewichtstücke benutzt. Als vereinfachter Umrechnungsfaktor dient: 1p = 10 mN (exakter Wert: 1p = 9,80665 mN).

Weiterhin wurde nachgeprüft, wie sich die Belastung von zwei benachbarten Zähnen auf die Berühr- und Druckschwellen des gemessenen Zahnes auswirkt. Dabei kamen an jedem belasteten Zahn die gleichen Belastungswerte wie im ersten Versuch zur Anwendung. Folgende Zahnpaarungen wurden untersucht:

gemessener Zahn	belastete Zähne
11	12 und 21
11	21 und 22
21	22 und 11
21	11 und 12
12	11 und 21
22	21 und 11

Mit dem nächsten Versuch sollte geklärt werden, ob Kräfte, die den Nachbarzahn belasten und deren Größe im Schwellenbereich liegt, den zu untersuchenden Zahn beeinflussen. Zu diesem Zweck wurden die Berühr- und Druckschwellen des Zahnes 11 gemessen, während jeweils ein Nachbarzahn (12 oder 21) einer Belastung von nacheinander 10 mN, 20 mN und 100 mN ausgesetzt war.

Durch einen weiteren Versuch sollte festgestellt werden, ob ein größerer Abstand zwischen gemessenem und belastetem Zahn den Resultaten im Schneidezahnbereich vergleichbare Ergebnisse bewirkt. Die hierfür untersuchten Zahnpaare waren 14 mit 23 und 24 mit 13. An den Prämolaren erfolgten die Schwellenmessungen, die Eckzähne wurden entsprechend dem Vorgehen beim ersten Versuch belastet.

Schließlich sollte das Schwellenverhalten in seinem zeitlichen Verlauf nach der Belastung eines Zahnes ermittelt werden, wobei einmal der zu messende Zahn selbst, das andere Mal ein Nachbarzahn belastet wurde.

Jenz (43) hat bei seinen Untersuchungen beobachtet, daß die Berührschwelle eines Zahnes durch die einer Messung vorausgehende Belastung erhöht wird. Das Ausmaß und die Dauer dieser Hyposensibilität sind abhängig von der Stärke und der Dauer der einwirkenden Kraft. Nach Entfernung der Belastung läßt die Hyposensibilität allmählich nach, und der Zahn kehrt zu seiner ursprünglichen Tastempfindlichkeit zurück.

Es stellt sich nun die Frage, ob eine derartige Verringerung der Sensibilität eines Zahnes auch durch die der Messung vorausgehende Belastung eines Nachbarzahnes bewirkt werden kann.

Bei diesem Versuch betrug das Belastungsgewicht 1000 mN, die Belastung dauerte dreißig Sekunden. Danach folgten Schwellenmessungen bis zum Erreichen der Leerwerte. Die untersuchten Zahnpaare waren:

gemessener Zahn	belasteter Zahn
11	11
11	12
12	12
12	11
21	21
21	22
22	22
22	21

Als Leerwerte bezeichnen wir die Werte der Berühr- und Druckschwellen, die am unbeeinflußten Zahn gemessen werden.

V. STATISTISCHE VERFAHREN

Die Messungen der Berühr- und Druckschwellen wurden mit einem Linienschreiber aufgezeichnet. Abbildung 5 (S. 34) zeigt ein Registrierbeispiel. Das Ausmessen der vom Probanden gegebenen Signale erfolgte in mm auf eine Stelle hinter dem Komma. Diese Werte wurden in mN auf ebenfalls eine Stelle hinter dem Komma umgerechnet.

Aus den Einzeldaten konnten dann für jede Meßreihe die arithmetischen Mittelwerte der Berührschwellen und der Druckschwellen sowie die dazugehörigen Standardabweichungen berechnet werden. Sie sind in mN auf zwei Stellen hinter dem Komma angegeben.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Meßdaten der Leerwertbestimmungen sind aus Tabelle 1 (S. 88ff.) ersichtlich. Die entsprechenden Angaben zu den Meßreihen, die unter dem Einfluß belasteter Zähne aufgenommen wurden, finden sich in den Tabellen 4 (S. 98 ff.), 7 (S.137 ff.) und 9 (S. 150 f.).

Beim Vergleich von Leerwerten der Berühr- und Druckschwellen eines Zahnes, die an verschiedenen Tagen gemessen worden waren, stellte sich heraus, daß signifikante Unterschiede vorkamen. Wir sind der Meinung, daß bei subjektiven Meßgrößen wie den vorliegenden, deren Werte endogenen Einflüssen der Versuchsperson unterliegen, die sich unserer Kenntnis entziehen, solche Werte durchaus als physiologisch anzusehen sind. Daher wurden bei den Probanden 5, 6 und 7, die sich für die aufwendigsten Versuchsreihen zur Verfügung gestellt hatten, alle Leerwerte der Berühr- und Druckschwellen eines Zahnes, auch

wenn sie an verschiedenen Tagen gemessen worden waren, zur Berechnung eines Gesamtmittelwertes herangezogen. Dieser bildete die Bezugsgröße für die weiteren Untersuchungen. Die Gesamtmittelwerte sind Tabelle 2 (S. 94 f.) zu entnehmen.

Zur Beantwortung der Frage nach einer bestimmten Beziehung zwischen der Berühr- und der Druckschwelle wurde bei 313 Meßreihen zunächst von jeder Einzelmessung das Verhältnis der Berühr- zur Druckschwelle berechnet. Daraus konnte dann für jede Meßreihe der Mittelwert aus den Verhältnissen gebildet werden (vergl. S.46).

Um festzustellen, ob zwischen den Mittelwerten bestimmter Meßreihen signifikante Unterschiede bestehen, fand der U- Test von Mann und Whitney (Sachs, 66) Anwendung. Zum Vergleich kamen einmal die Meßreihen eines Zahnes, die unter der zunehmenden Belastung eines oder zweier Nachbarzähne aufgenommen worden waren. Damit sollte deren Einfluß untersucht werden (s. Tab. 5, S. 112 ff., Tab.8, S. 143 ff. und Tab. 10, S. 152 f.). Ferner wurden diejenigen Meßreihen verglichen, bei denen verschiedene Nachbarzähne jeweils unter der gleichen Belastung gestanden hatten. Dies diente zur Klärung einer möglichen Bedeutung der Entfernung des belasteten Zahnes vom gemessenen Zahn (s. Tab. 6, S. 127 ff.).

Die Einzelheiten der genannten Auswertungen werden im Kapitel VI, Untersuchungsergebnisse, beschrieben.

Beispiele der Meßreihen, die den Einfluß belasteter Zähne festhielten, sind als Stabdiagramme in den Abbildungen 6 - 14 wiedergegeben.

Die Darstellung der Versuche, mit denen der zeitliche Verlauf des Schwellenverhaltens nach der Belastung des zu messenden Zahnes oder eines Nachbarzahnes geprüft wurde, erfolgte in Kraft-Zeit-Kurven. Die Abb. 15 (S. 69) und 16 (S. 70) zeigen solche Beispiele.

Die statistische Auswertung des Datenmaterials wurde im Zentrum für Datenverarbeitung der Universität Tübingen auf der Rechenanlage TR 440[1] durchgeführt[2].

1 Fa. Telefunken

2 An dieser Stelle möchte ich Herrn Dr. Schubring und Herrn Schill für die freundliche Unterstützung danken.

VI. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

1. Berührschwelle und Druckschwelle

Um eine eindeutige begriffliche Unterscheidung zu ermöglichen, haben wir das erste Erkennen einer Sensation am Zahn als Berührschwelle, das Einsetzen des Druckgefühls als Druckschwelle bezeichnet (vgl. Abb. 5, S. 34).

Die Mittelwerte der Berühr- und Druckschwellen liegen bei unseren Probanden in folgenden Bereichen (die einzelnen Mittelwerte und die dazugehörigen Standardabweichungen sind aus Tabelle 1, S. 88ff. , ersichtlich).

Zahn	Streubereich der Berührschwellenmittelwerte des vorliegenden Probandengutes (in mN)	Streubereich der Druckschwellenmittelwerte des vorliegenden Probandengutes (in mN)
11	7,68 bis 17,42	20,62 bis 56,35
12	10,20 bis 17,39	29,50 bis 45,02
21	8,08 bis 15,35	19,47 bis 38,10
22	9,50 bis 21,46	19,16 bis 44,45
14	9,54 bis 29,11	17,85 bis 65,21
24	6,57 bis 22,88	12,42 bis 46,52

In Tabelle 2 (S.94f.) sind von den Probanden 5, 6 und 7 die Gesamtmittelwerte der Oberkieferschneidezähne angegeben, die aus den an verschiedenen Tagen aufgenommenen Leerwertmeßreihen berechnet wurden.

Ein mit den Meßwerten der Probanden 5, 6 und 7 durchgeführter Vergleich der Berühr- und Druckschwellenleerwerte der Oberkieferfrontzähne mittels U-Test ergab, daß die

Schwellen der rechten und linken mittleren Schneidezähne in etwa zwei Dritteln der Fälle dieselbe Größenordnung haben. Das gleiche gilt für die seitlichen Schneidezähne. Dagegen unterscheiden sich die Schwellen der mittleren und seitlichen Schneidezähne einer Kieferhälfte in ungefähr zwei Dritteln der Fälle voneinander. Die Schwellenmittelwerte der seitlichen Schneidezähne sind in den Fällen signifikanter Unterschiede größer als die der mittleren Schneidezähne. Die einzelnen Vergleiche sind in Tabelle 3 (S. 96 f.) aufgeführt.

Bei 313 Meßreihen wurde von jeder Messung das Verhältnis der Berühr- zur Druckschwelle bestimmt und daraus der Mittelwert der Verhältnisse für die jeweilige Meßreihe.

In ungefähr 80 Prozent der Fälle war die Druckschwelle um das 1,5 - 3,0fache größer als die Berührschwelle. Bei etwa 8 Prozent war der Quotient aus Druck- und Berührschwelle kleiner, bei etwa 11 Prozent größer. Ungefähr 66 Prozent der untersuchten Verhältnisse zeigten für die Druckschwelle den 1,5 - 2,5fachen Wert der Berührschwelle. Den 1,6 - 2,4fachen Betrag der Berührschwelle wies die Druckschwelle in etwa 52 Prozent der Fälle auf.

2. Einfluß der Belastung eines Zahnes mit 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN auf die Berühr- und Druckschwelle des nichtbelasteten Nachbarzahnes

Dieser Versuch sollte klären, ob die sensorischen Eigenschaften zweier gereizter Zähne gegenseitigen Einflüssen unterliegen. Für die Messungen wurden die Oberkieferfrontzähne der Probanden 5, 6 und 7 herangezogen.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen dieser Meßreihen sind in Tabelle 4, S. 98 ff., angegeben.

Die Auswertung der Meßdaten erfolgte mit dem U-Test nach Mann und Whitney für Berühr- und Druckschwelle unabhängig voneinander. Zunächst wurden die Mittelwerte der Leerwertmeßreihen mit den Mittelwerten verglichen, deren Meßreihen unter der Belastung der Nachbarzähne mit 100 mN entstanden waren. Es folgten die Vergleiche letzterer mit den Mittelwerten bei einer Belastung von 200 mN. Diese kamen zum Vergleich mit den Mittelwerten der Meßreihen, die mit einer Belastung von 500 mN aufgenommen worden waren. Schließlich wurden die von 500 mN beeinflußten Messungen mit den bei einer Belastung von 1000 mN durchgeführten verglichen.

Die vorgenommenen Mittelwertvergleiche sind im folgenden nochmals in einer Übersicht dargestellt:

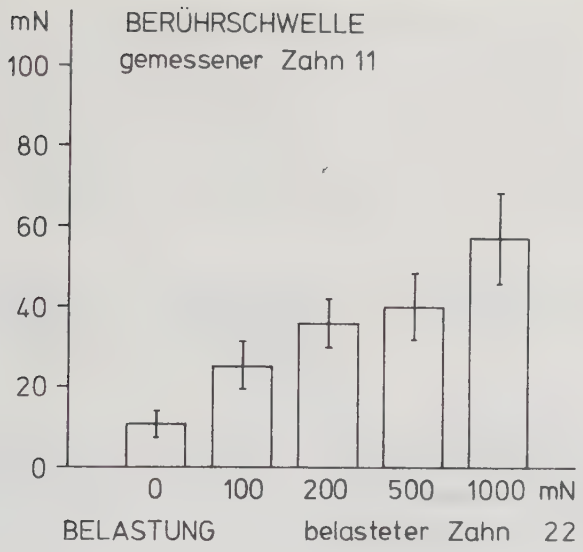
Die Berührschwellenwerte bei Belastung des Nachbarzahnes mit	wurden verglichen mit den	Berührschwellenwerten bei Belastung des Nachbarzahnes mit
0 mN		100 mN
100 mN		200 mN
200 mN		500 mN
500 mN		1000 mN

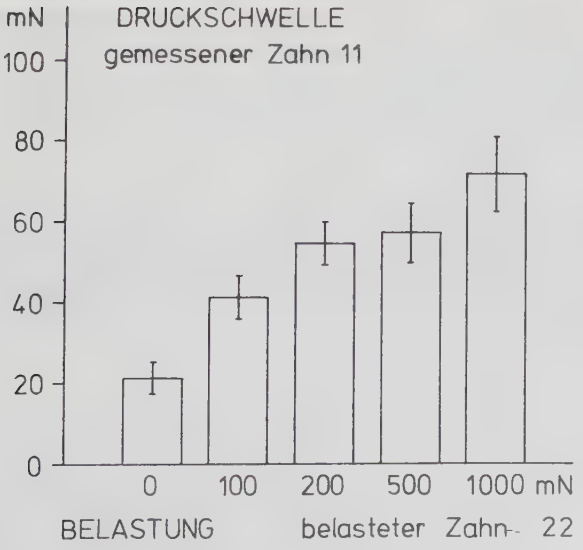
Entsprechendes gilt für die Mittelwertvergleiche der Druckschwellen.

Die einzelnen Vergleiche sind Tabelle 5, S. 112 ff., zu entnehmen.

Bei diesem Versuch konnte festgestellt werden, daß die Berühr- und Druckschwellen eines Zahnes durch die Belastung benachbarter Zähne beeinflußt werden. Sowohl die Berührschwelle als auch die Druckschwelle stiegen mit wachsender Belastung zunehmend an. Ein Beispiel zeigt Abb. 6, S. 49.

Abb. 6: (S. 49) Darstellung einer an Proband 7 durchgeführten Versuchsreihe.
Gemessener Zahn: 11, belasteter Zahn: 22.
Die angewandten Belastungen waren 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN. Die Höhe einer Säule gibt den Mittelwert der jeweiligen Meßreihe an, die an der Spitze eingezeichnete senkrechte Linie die dazugehörige Standardabweichung. Die erste Säule mit der Belastung 0,0 mN stellt den Leerwert des gemessenen Zahnes dar. Die Angaben der Belastung sind aufgerundet (1p = 9,81 mN, vgl. Fußnote S. 38).


mN
BERÜHRSCHWELLE
gemessener Zahn 11
100
80
60
40
20
0
0
100
200
500
1000 mN
BELASTUNG
belasteter Zahn 22


mN
DRUCKSCHWELLE
gemessener Zahn 11
100
80
60
40
20
0
0
100
200
500
1000 mN
BELASTUNG
belasteter Zahn 22

Die folgende Übersicht macht die Wirkung von Kraftreizen auf die Schwellen benachbarter Zähne deutlich. Sie gibt an, in wieviel Prozent der untersuchten Fälle Berühr- und Druckschwelle eines Zahnes bei Belastung eines benachbarten Zahnes mit 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN gegenüber der Messung am unbeeinflußten Zahn (entsprechend dem Leerwert) anstiegen.

Verglichene Meßreihen	Anstieg der Berührschwelle in Prozent der untersuchten Fälle	Anstieg der Druckschwelle in Prozent der untersuchten Fälle
Leerwert - Belastung 100 mN	91,7	91,7
Leerwert - Belastung 200 mN	97,2	100,0
Leerwert - Belastung 500 mN	97,2	100,0
Leerwert - Belastung 1000 mN	100,0	100,0

Die vorstehende Übersicht zeigt deutlich, daß Kraftreize von recht geringer Stärke eine Sensibilitätsverminderung an benachbarten Zähnen bewirken. Die Erhöhung der Berührschwelle war bereits bei einer Belastung mit 100 mN in 64 Prozent der untersuchten Fälle signifikant, die Erhöhung der Druckschwelle bei der gleichen Belastung in 86 Prozent der Fälle.

Nachfolgend sind die prozentualen Häufigkeiten signifikanter Schwellenerhöhungen bei Einzelzahnbelastung im Frontzahnbereich mit 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN angegeben.

Verglichene Belastungsstufen	Berührschwelle	Druckschwelle
0 mN - 100 mN	64 %	86 %
100 mN - 200 mN	44 %	53 %
200 mN - 500 mN	22 %	31 %
500 mN - 1000 mN	36 %	58 %

Auch diese Übersicht veranschaulicht den deutlichen Einfluß von Kraftreizen an Zähnen auf die Sensibilität der Nachbarzähne.

Die beschriebenen Schwellenerhöhungen konnten nicht durchgängig beobachtet werden. Manchmal wurde der Zuwachs bei einer Versuchsreihe in der Form unterbrochen, daß die Schwellenmittelwerte auf einer Belastungsstufe nicht zusondern abnahmen und erst bei der nächst höheren Belastung wieder anstiegen. Die Stabdiagramme einer solchen Versuchsreihe zeigt Abb. 7, S. 52.

Es kam auch vor, daß bei einer Versuchsreihe unter den Belastungen von 100 mN, 200 mN und 500 mN ein Anstieg der Schwellen zu sehen war, während sie bei 1000 mN sanken. Ein ähnlicher Abbruch der Schwellenzunahme konnte in einigen Fällen bereits bei einer Belastung von 500 mN oder 200 mN gesehen werden. Beispiele für solche Versuchsreihen, bei denen die Erhöhungen der Schwellen auf einem bestimmten Niveau endeten, sind in den Abbildungen 8, S. 53,und 9, S. 54, zu sehen.

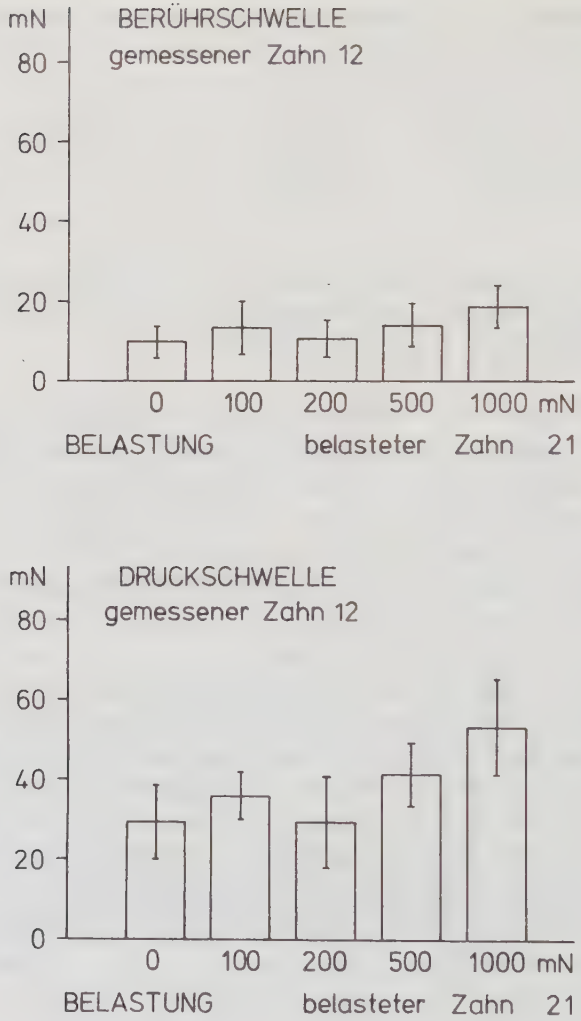


Abb. 7: Darstellung einer Versuchsreihe, die an Proband 5 aufgenommen wurde.
Gemessener Zahn: 12, belasteter Zahn: 21
Die durch die zunehmende Belastung des Zahnes 21 verursachte Schwellenerhöhung am Zahn 12 war nicht regelmäßig. Bei der Belastung mit 200 mN sanken die Schwellenmittelwerte gegenüber den vorangegangenen Meßreihen. Die folgende Belastungsstufe zeigte wieder Schwellenanstiege.

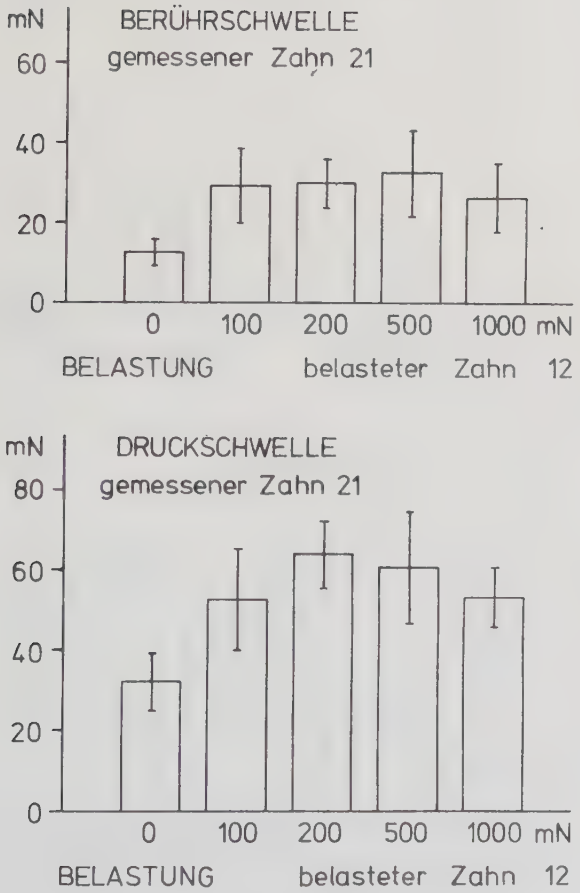
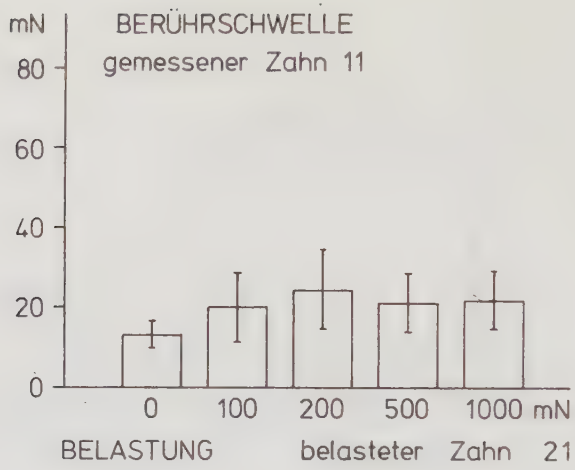


Abb. 8: Stabdiagramme einer an Proband 6 aufgenommenen Versuchsreihe.
Gemessener Zahn: 21, belasteter Zahn: 12.



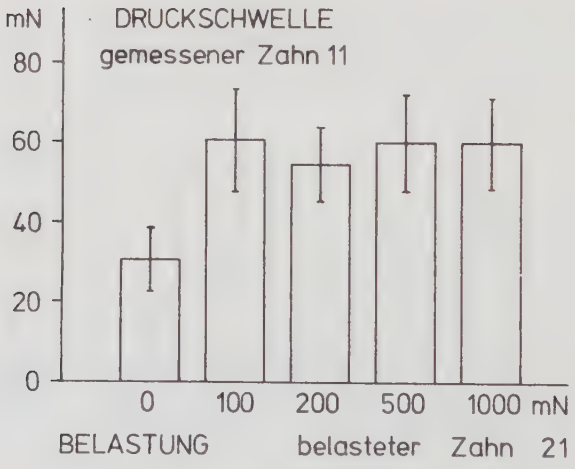


Abb. 9: Stabdiagramme einer an Proband 6 aufgenommenen Versuchsreihe.
Gemessener Zahn: 11, belasteter Zahn: 21.

In diesem Zusammenhang soll nochmals betont werden, daß der Einfluß der Belastung eines Nachbarzahnes im Sinne einer Schwellenerhöhung am gemessenen Zahn bei den vorliegenden Versuchen eindeutig festgestellt werden kann.

Damit bestätigt sich die angestellte Vermutung (vgl. S. 22). Die bis jetzt erörterten Versuche zeigen deutlich, daß zwei gereizte Zähne ihre sensorischen Eigenschaften gegenseitig beeinflussen.

Die Untersuchung einer möglichen Bedeutung der Entfernung des belasteten Zahnes vom gemessenen Zahn erfolgte wiederum mit Hilfe des U-Testes von Mann und Whitney. Es wurden jeweils alle Meßreihen, die unter der gleich starken Belastung eines Nachbarzahnes aufgenommen worden waren, miteinander verglichen (Einzelvergleiche s. Tabelle 6, S. 127 ff.).

Man hätte vermuten können, daß die Belastung eines Zahnes derselben Kieferhälfte eine stärkere Wirkung hat als die eines Zahnes der anderen Seite. Ebenso wäre anzunehmen gewesen, daß ein weiter entfernter Zahn einen geringeren Einfluß hat als ein direkt benachbarter. Beides trat so nicht ein. Zum Beispiel kann die Belastung des Zahnes 21 für die Sensibilität von 11 die gleiche Bedeutung haben wie die Belastung der Zähne 12 oder 22. In allen Fällen können Berühr- und Druckschwelle von 11 in ähnlicher Weise ansteigen. Entsprechendes gilt für den Zahn 21. Auf die Sensibilität von 12 können die Belastung von 11 und die von 21 oder 22 eine ähnliche Wirkung haben, was für den Zahn 22 entsprechend gilt.

Die folgende Übersicht zeigt die prozentualen Häufigkeiten signifikanter Schwellenerhöhungen bei ipsi- und bei kontralateraler Zahnbelastung.

Prozentuale Häufigkeit signifikanter Schwellenerhöhungen bei ipsi- und kontralateraler Zahnbelastung im Frontzahnbereich

BELASTUNGSSTUFE	IPSILATERALE ZAHNBELASTUNG		KONTRALATERALE ZAHNBELASTUNG	
	Berührschwelle	Druckschwelle	Berührschwelle	Druckschwelle
0 - 100 mN	67 %	83 %	63 %	88 %
100 - 200 mN	58 %	67 %	38 %	46 %
200 - 500 mN	25 %	50 %	21 %	25 %
500 - 1000 mN	33 %	58 %	38 %	58 %

Die Messungen an den seitlichen Schneidezähnen scheinen darauf hinzuweisen, daß der Einfluß des belasteten Zahnes mit zunehmender Entfernung vom gemessenen Zahn abnimmt. Ein weiterer Versuch hierzu ist im fünften Abschnitt dieses Kapitels beschrieben.

3. Einfluß der Belastung von zwei Zähnen mit je 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN auf das Verhalten der Berühr- und Druckschwellen des unbelasteten Nachbarzahnes

Die Schwellenmessungen dieses Versuches erfolgten ebenfalls an den vier Oberkieferschneidezähnen der Probanden 5, 6 und 7.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der entsprechenden Meßreihen sind in Tabelle 7, S. 137 ff., aufgeführt, die Ergebnisse der mit dem U-Test von Mann und Whitney vorgenommenen Vergleiche in Tabelle 8, S. 143 ff.

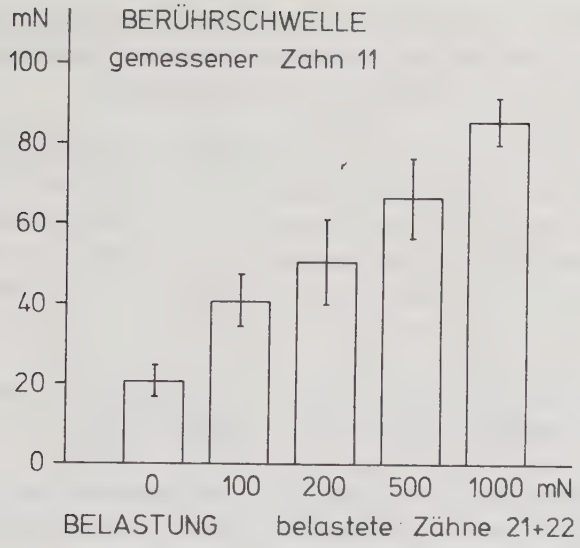
Abbildung 10 (S. 59) zeigt die Stabdiagramme einer der Versuchsreihen, die unter der Belastung von zwei Zähnen aufgenommen wurden.

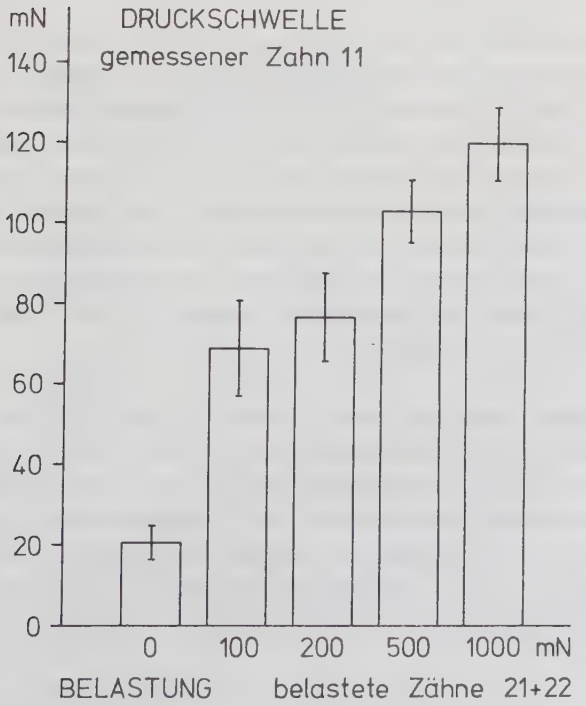
Bei diesem Versuch konnte beobachtet werden, daß sich die Berühr- und Druckschwellen eines Zahnes unter der zunehmenden Belastung zweier Nachbarzähne gegenüber dem Anstieg unter der Belastung eines Nachbarzahnes stärker erhöhten. Es kam auch vor, daß die Berühr- oder die Druckschwelle auf einer der Belastungsstufen einmal niedriger lag als während der Belastung eines Nachbarzahnes. Insgesamt war jedoch deutlich zu erkennen, daß die beiden Schwellen bei der vorliegenden Versuchsanordnung im Vergleich zu dem Versuch mit einem belasteten Zahn nochmals anstiegen. Sie hatten in der Mehrzahl der Fälle den etwa 1,3 - 2,0fachen Wert verglichen mit Meßreihen unter der Belastung eines Zahnes.

In der folgenden Übersicht (vgl. S. 51) sind die prozentualen Häufigkeiten signifikanter Schwellenerhöhungen bei Doppelzahnbelastung im Frontzahnbereich mit 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN angegeben.

Verglichene Belastungsstufen	Berührschwelle	Druckschwelle
0 mN - 100 mN	100 %	100 %
100 mN - 200 mN	44 %	56 %
200 mN - 500 mN	44 %	50 %
500 mN - 1000 mN	44 %	56 %

Abb. 10: (S. 59) Stabdiagramme einer an Proband 7 aufgenommenen Versuchsreihe.
Die Messungen erfolgten am Zahn 11, während die Zähne 21 und 22 mit je 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN belastet waren. Die Belastung zweier Zähne führte zu höheren Berühr- und Druckschwellen als die Belastung eines Zahnes (vgl. Abb.6, S. 49).


mN
BERÜHRSCHWELLE
gemessener Zahn 11
100
80
60
40
20
0
0
100
200
500
1000 mN
BELASTUNG
belastete Zähne 21+22


mN
DRUCKSCHWELLE
gemessener Zahn 11
140
120
100
80
60
40
20
0
0
100
200
500
1000 mN
BELASTUNG
belastete Zähne 21+22

4. Einfluß der Belastung eines Zahnes mit 10 mN, 20 mN und 100 mN auf das Verhalten der Berühr- und Druckschwellen des unbelasteten Nachbarzahnes

Um den möglichen Einfluß der Belastung eines Nachbarzahnes mit Kräften, die im Schwellenbereich liegen, festzustellen, wurden bei den Probanden 2, 3 und 5 Meßreihen am Zahn 11 aufgenommen, während einmal der Zahn 12, das andere Mal der Zahn 21 einer Belastung von nacheinander 10 mN, 20 mN und 100 mN ausgesetzt war.

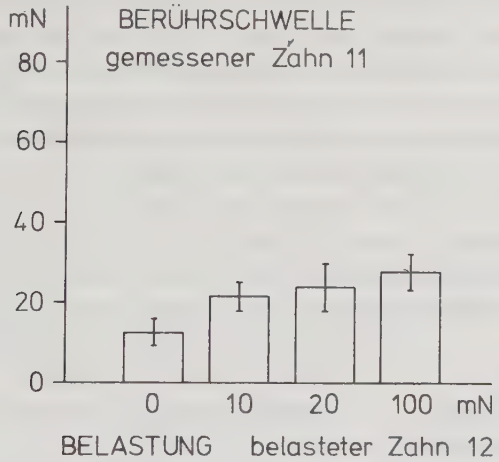
Die Mittelwerte und Standardabweichungen dieser Meßreihen sind in Tabelle 9, S. 150 f., aufgeführt.

Die Auswertung der Meßdaten erfolgte wiederum mit dem U-Test von Mann und Whitney für Berühr- und Druckschwelle unabhängig voneinander.

Zunächst wurden die Mittelwerte aus den Meßdaten zur Leerwertbestimmung und die Mittelwerte der Meßreihen, bei denen einer der Nachbarzähne des gemessenen Zahnes mit 10 mN belastet war, verglichen. Es folgten die Vergleiche der von 10 mN beeinflußten Messungen mit denen, die unter der Belastung von 20 mN aufgenommen worden waren. Schließlich wurden diese mit den Mittelwerten der Meßreihen verglichen, bei welchen die Belastung der Nachbarzähne 100 mN betragen hatte. Die einzelnen Vergleiche sind Tabelle 10, S. 152 f., zu entnehmen.

Bei dieser Auswertung stellte sich heraus, daß bereits die Belastung eines Nachbarzahnes mit 10 mN einen Einfluß sowohl auf die Berührschwelle als auch auf die Druckschwelle des gemessenen Zahnes hatte. Mit zunehmender Belastung stiegen auch die Schwellen weiter an. Die Schwellenerhöhungen waren nicht in jedem Fall signifikant, aber es konnte

stets ein Zuwachs verzeichnet werden. Die graphische Darstellung einer solchen Versuchsreihe zeigt Abb. 11.



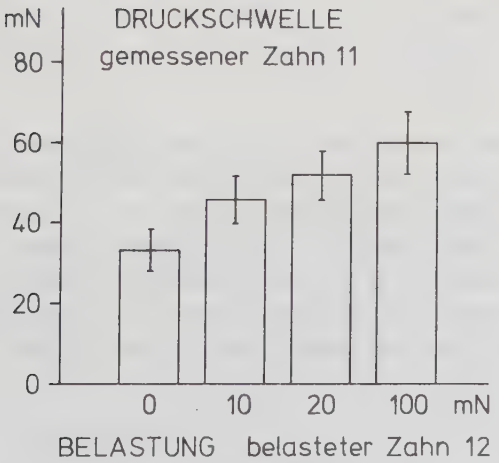


Abb. 11: Stabdiagramme einer Versuchsreihe, die an Proband 3 aufgenommen wurde.
Die Messungen erfolgten am Zahn 11, während auf den Zahn 12 Kräfte von 10 mN, 20 mN und 100 mN wirkten.

Die kleinste angewandte Belastung betrug 10 mN. Die Berührschwellen der belasteten Zähne hatten mit einer Ausnahme (Zahn 21 bei Proband 5) einen höheren Wert. Ihre Druckschwellen lagen mit der gleichen Ausnahme sogar über der nächst höheren Belastung von 20 mN. Dennoch war die Schwellenzunahme des gemessenen Zahnes gegenüber dem Leerwert sowohl bei der Berührschwelle als auch bei der Druckschwelle unter der Belastung eines Nachbarzahnes mit 10 mN in allen Fällen signifikant.

Die folgende Übersicht (vgl. S. 51, S. 56 und S. 58) zeigt die prozentualen Häufigkeiten signifikanter Schwellenerhöhungen bei diesem Versuch.

Verglichene Belastungsstufen	Berührschwelle	Druckschwelle
0 mN - 10 mN	100 %	100 %
10 mN - 20 mN	33 %	50 %
20 mN - 100 mN	17 %	83 %

Da Proband 5 sich für alle bisher erörterten Versuche zur Verfügung gestellt hatte, war es in diesem Fall möglich, deren Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Danach scheint die Art der Belastungszunahme, einmal in der Reihe 10 mN, 20 mN, 100 mN, das andere Mal in der Reihe 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN, keine Bedeutung für das Schwellenverhalten zu haben. Eine

solche Interpretation legt auch ein Vergleich der übrigen Ergebnisse, die an verschiedenen Probanden ermittelt wurden, nahe. Die Schwellenzunahmen vergleichbarer Versuchsreihen aus den zwei Versuchen gestalten sich einander ähnlich, Das bedeutet, daß am Ende der Belastungsreihe 10 mN, 20 mN, 100 mN und am Ende der Reihe 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN ähnliche Schwellenwerte stehen. Die Reihe mit den kleineren Belastungen konnte sogar zu höheren Endwerten der Berühr- und Druckschwellen führen als die andere Reihe.

Einen Vergleich zweier solcher Versuchsreihen zeigen die Abbildungen 12, S. 64, und 13, S.65.

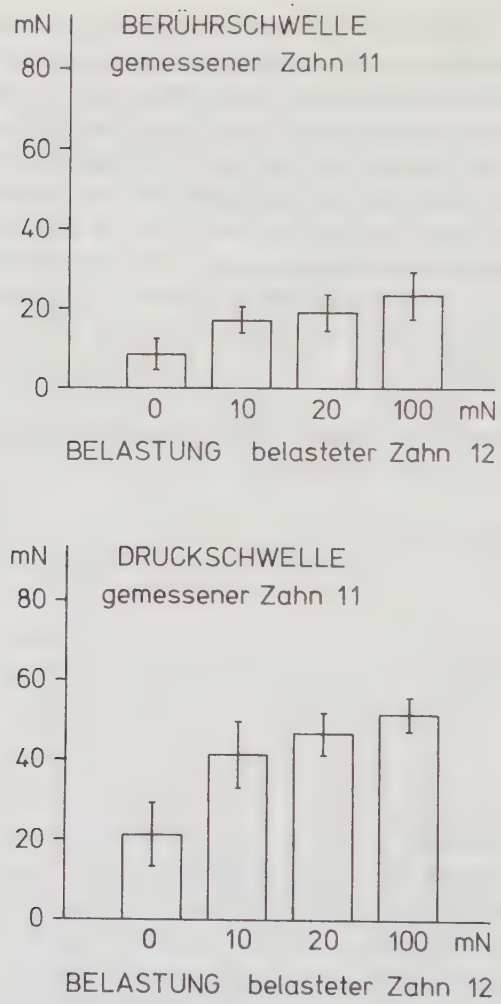


Abb. 12: Stabdiagramme einer Versuchsreihe, die an Proband 5 aufgenommen wurde.
Gemessener Zahn: 11, belasteter Zahn: 12.
Obwohl die hier angewandten Belastungen mit 10 mN, 20 mN und 100 mN wesentlich kleiner sind als bei der in Abb. 13 dargestellten Versuchsreihe, kann ein ähnlicher Schwellenanstieg beobachtet werden. Unter der Belastung mit 100 mN werden sogar höhere Schwellenwerte erreicht als unter der Belastung mit 500 mN und 1000 mN bei der anderen Versuchsreihe.

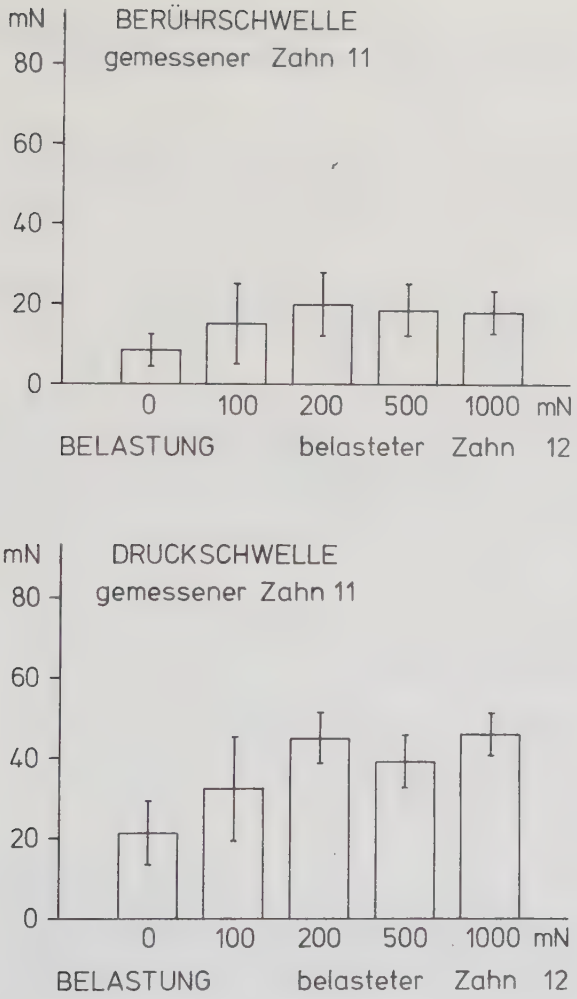


Abb. 13: Stabdiagramme einer Versuchsreihe, die an Proband 5 aufgenommen wurde.
Gemessener Zahn: 11, belasteter Zahn: 12.
Unter den hier angewandten Belastungen wird ein ähnlicher Schwellenanstieg beobachtet wie bei der in Abb. 12 dargestellten Versuchsreihe mit wesentlich geringeren Belastungen.

5. Berührschwelle und Druckschwelle bei größerem Abstand des gemessenen Zahnes vom belasteten Zahn

Die für diesen Versuch mit den Probanden 3, 7 und 8 durchgeführten Messungen erfolgten an den Zähnen 14 und 24, während jeweils der Eckzahn der Gegenseite mit 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN belastet war.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen dieser Meßreihen sind in Tabelle 4, S.109 ff., aufgeführt.

Das bei diesen Versuchsreihen beobachtete Schwellenverhalten stimmt nicht mit den bisher beschriebenen Ergebnissen überein, die im Frontzahnbereich gewonnen wurden. Die zunehmende Belastung der Eckzähne führte zu keinem entsprechenden Anstieg der Schwellen bei den gemessenen Prämolaren.

Abbildung 14 zeigt die Stabdiagramme einer solchen Versuchsreihe (s. S. 67).

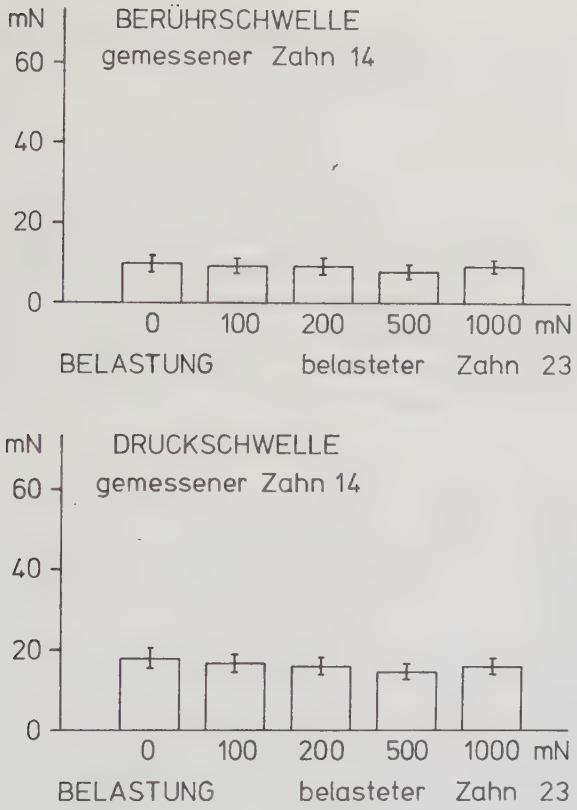


Abb. 14: Darstellung einer Versuchsreihe, die an Proband 7 aufgenommen wurde.
Gemessener Zahn: 14, belasteter Zahn: 23.
Die Belastungen von 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN, die auf den Eckzahn wirkten, führten zu keinen Schwellenerhöhungen am gemessenen Prämolaren.

6. Zeitlicher Verlauf des Schwellenverhaltens nach der Belastung eines Zahnes

Um das Schwellenverhalten im Anschluß an die Belastung eines Zahnes zu untersuchen, wurde mit den Probanden 1, 2 und 4 ein Versuch durchgeführt, bei dem einmal der zu messende Zahn selbst, das andere Mal ein Nachbarzahn vor den Messungen belastet wurde. Die angewandte Belastung betrug 1000 mN und dauerte 30 Sekunden. Daran schlossen sich Schwellenmessungen bis zum Erreichen der Leerwerte an.

Die Auswertung der Meßdaten ergab, daß es bei der vorliegenden Versuchsanordnung mit einer 30 Sekunden währenden Belastung von 1000 mN nicht möglich ist, deren Einfluß zu beurteilen. Es gab Meßreihen, bei denen die vorausgegangene Belastung, entweder des gemessenen Zahnes oder des Nachbarzahnes, zu einer Schwellenerhöhung führte, die allmählich wieder abklang. Ebenso konnte aber auch beobachtet werden, daß ein Einfluß der vorausgegangenen Belastung fehlte. Diese Meßreihen zeigten lediglich die auch bei unbeeinflußten Messungen (Leerwertmessungen) zu erwartenden Schwankungen.

Die Abbildungen 15, S. 69, und 16, S. 70, zeigen für beide Möglichkeiten jeweils ein Beispiel.

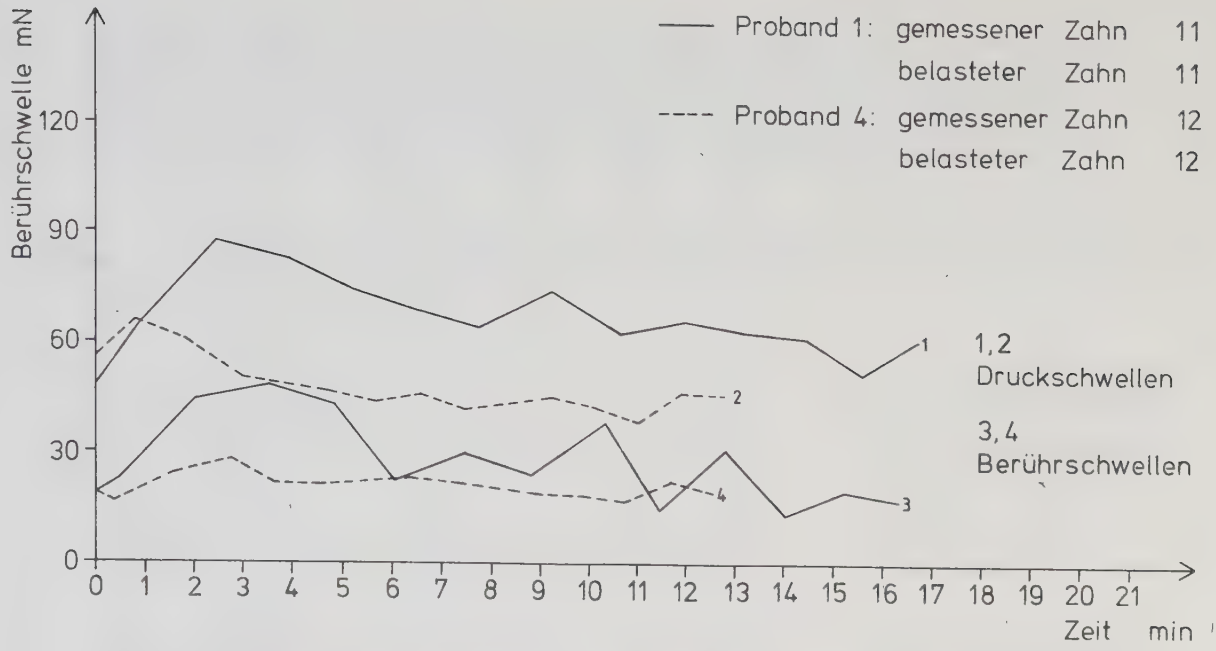


Abb. 15: Kraft-Zeit-Kurven einer an Proband 1 und einer an Proband 4 aufgenommenen Meßreihe. In beiden Fällen war der zu messende Zahn selbst vor der Messung belastet worden. Die beiden unteren Kurven geben die gemessenen Berührschwellenwerte wieder, die beiden oberen Kurven die Druckschwellenwerte. Die zum Zeitpunkt O angegebenen Werte entsprechen den Leerwerten vor der Belastung. Die mit einer durchgezogenen Linie gezeichneten Kurven geben ein Schwellenverhalten wieder, das durch die vorausgegangene Belastung beeinflußt wurde. Bei den gestrichelt gezeichneten Kurven ist das nicht der Fall. Hier führte die Belastung zu keiner vorübergehenden Erhöhung der Schwellen.

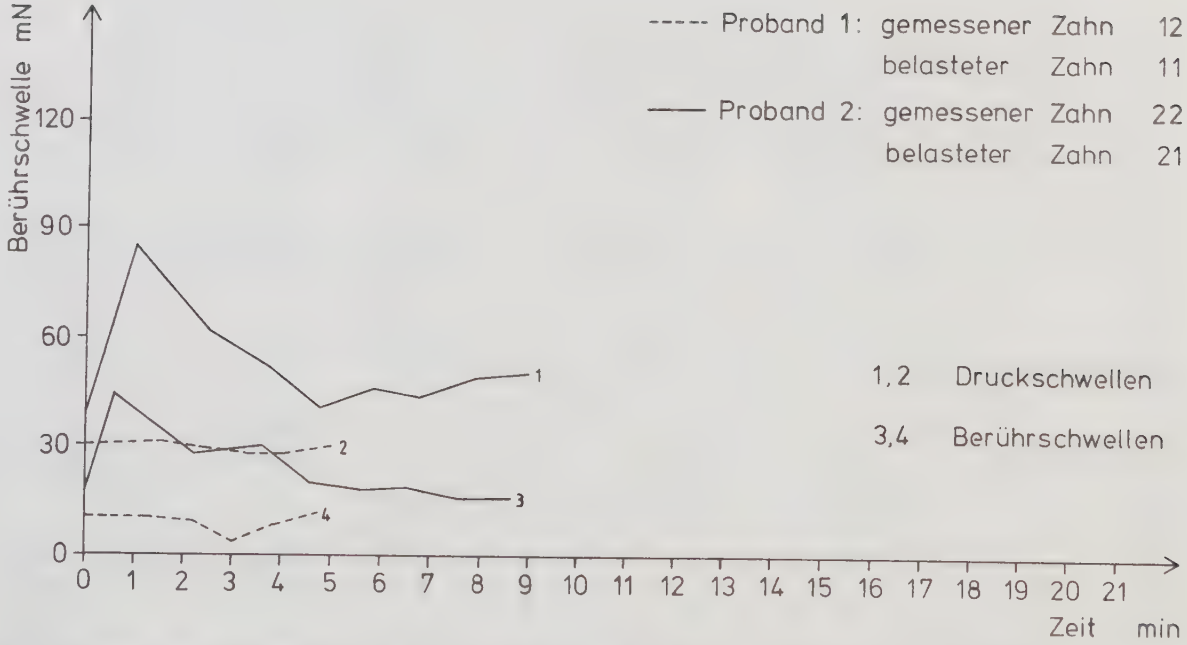


Abb. 16: Kraft-Zeit-Kurven einer mit Proband 1 und einer mit Proband 2 durchgeführten Meßreihe. Gemessene und belastete Zähne sind verschieden. Auch hier kann wie bei den in Abb. 15 dargestellten Meßreihen beobachtet werden, daß die der Messung vorausgegangenen Belastungen in einem Fall zu einer Erhöhung der Schwellen führten im anderen Fall nicht. Die beiden unteren Kurven geben die gemessenen Berührschwellenwerte die beiden oberen Kurven die Druckschwellenwerte wieder.

VII. DISKUSSION

Mit der vorliegenden Arbeit wurde versucht, den Einfluß eines mechanischen Reizes an einem Zahn auf die taktile Sensibilität benachbarter Zähne zu klären. Hannam (33), Jerge (44) und andere Autoren hatten festgestellt, daß sensorische Neuronen mehrere benachbarte Zähne innervieren können (s. S. 15). Dies legte die Vermutung nahe, daß die taktile Sensibilität bei Reizung zweier Zähne verändert wird.

Die Schwellenmessungen erfolgten mit dem federgefesselten Drehschwinger. Die beim größten Teil der Messungen angewandten Dehnmeßstreifen haben den Vorteil, daß gegenüber piezo-resistiven Halbleiterelementen der lineare Meßbereich größer, der Linearitätsfehler kleiner ist. Dadurch wird der Gesamtfehler der Meßanordnung erheblich reduziert. Er beträgt unter Benutzung der piezo-resistiven Halbleiterelemente 1,45 Prozent vom Vollausschlag am Schreiber, mit den Dehnmeßstreifen vermindert er sich auf 0,55 Prozent. Ein objektiver Fehler dieser Größenordnung kann gegenüber dem subjektiven Fehler, der vom Probanden ausgeht und nicht kontrollierbar ist, als geringfügig bewertet werden.

Bei unseren Versuchen bestätigte sich die Auffassung von Jenz, Mühlbradt (43), die als adäquate Bezeichnung der Schwellenwahrnehmung die Beschreibung der Schwelle als "sensorisches Intervall" eingeführt haben.

Green und Swets (26) weisen darauf hin, daß in der psychophysikalischen Forschung die Vorstellung von sensorischen

Schwellen durch das "Konzept eines ständig schwankenden, ungeteilten Empfindungsvermögens" ersetzt wird. Die Streuungen der Meßwerte bei Schwellenmessungen, die sich in der vorliegenden Arbeit zeigen, sind Ausdruck der von diesen Autoren beschriebenen Schwellentheorie.

Eine mögliche Erklärung für das Auftreten von zwei Schwellen, einer Berühr- und einer Druckschwelle, bieten die Beobachtungen von Hannam an Hunden (31, 34). Er stellte fest, daß schnell adaptierende, parodontale Mechanorezeptoren eine höhere Reizschwelle und längere Latenzzeit hatten als langsam adaptierende. Er sah darin einen Hinweis auf die Möglichkeit, daß die schnell adaptierenden Rezeptoren nicht wie die langsam adaptierenden im Parodontium sondern im Alveolarperiost liegen. Dies könnte bedingen, daß für ihre Erregung eine stärkere Kraft am Zahn angreifen muß als für die Erregung der im Parodontium liegenden Rezeptoren.

Diese Interpretation könnte auch das Entstehen zweier Schwellen, einer Berühr- und einer Druckschwelle beim Menschen erklären. Danach würde eine zunehmende Kraft zuerst die langsam adaptierenden und mit kurzer Latenzzeit schon auf geringe Kräfte reagierenden Rezeptoren erregen. Bei stärkeren Kräften käme dann die Antwort der schnell adaptierenden Rezeptoren hinzu, die eine höhere Schwelle und längere Latenzzeit haben.

Versuche wie die hier beschriebenen werden von zahlreichen Faktoren beeinflußt, die sich einer äußeren Kontrolle zum Teil entziehen. Einige der möglichen Faktoren sollen im folgenden angesprochen werden.

Haider, Spong und Lindsley (30) beobachteten in Untersuchungen über die Aufmerksamkeit während Versuchen von ähnlicher Dauer wie die vorliegenden eine allmählich eintretende Ermüdung und damit nachlassende Aufmerksamkeit. Die Versuche der genannten Autoren dauerten achtzig bis hundert Minuten und verlangten von den Probanden eine ununterbrochene Konzentration auf die gestellte Aufgabe. Um solche Ermüdungserscheinungen zu reduzieren, legten wir nach jeweils fünf Messungen eine längere Erholungspause ein.

Ein anderer Einfluß, dem Schwellenmessungen unterliegen, ist intellektueller Natur. Hierauf weist Stevens hin (79). Zunächst erhebt sich die Frage, ob der Proband die ihm vom Versuchsleiter gegebenen Erklärungen so versteht, wie dieser sie meint. Auch wenn das erfüllt ist, kommt noch viel auf die Vorstellungen des Probanden an. Für die Messungen der Berühr- und Druckschwellen bedeutet dies, daß insbesondere die Druckschwelle davon abhängt, bei welcher auf den Zahn ausgeübten Kraft die Versuchsperson ihre Empfindung als Druck definiert.

Die anatomischen Gegebenheiten, zu denen beispielsweise die Zahnwurzellänge zählt, oder die Struktur des Zahnhalteapparates, die aus den jeweiligen Belastungsformen eines Zahnes herrührt, dürften ebenso eine Rolle spielen wie individuell bedingte Differenzen in Anzahl und Art der Mechanorezeptoren. Ein Einfluß dieser Faktoren auf das "Tastorgan" Zahn würde sich in den Werten der Berühr- und Druckschwellen äußern.

Von Bekesy und Pollack weisen darauf hin, daß die Fähigkeit eines Beobachters, ein bestimmtes "Signal" zu erkennen, entscheidend davon abhängt, inwieweit sich das "Signal" vom

"Geräusch", das es umgibt, das heißt, von allen anderen, auch auf den Beobachter einströmenden Reizen, abhebt (8, 64). Der Signal-Rausch-Abstand ist ein, hier ebenfalls zu erörternder Faktor. Der Mensch als Versuchsperson erkennt schwache Signale aus dem auf ihn einströmenden Informationsfluß wesentlich schlechter als ein konstruierter "idealer Beobachter". Wenn sich dieser geringe Signal-Rausch-Abstand aber vergrößert, verbessern sich auch die vom Menschen erzielten Beobachtungsergebnisse. Das bedeutet, daß bei Schwellenmessungen äußere Störungen möglichst zu vermeiden sind, was in den vorliegenden Untersuchungen angestrebt wurde. Dennoch bleibt ein gewisses "Rauschen" bestehen, das die Messungen beeinflußt. Hierzu gehören besonders endogene Faktoren der Versuchsperson, wie Puls, Atmung, Speichelfluß, Muskeltonus und andere. Weitere Einflüsse können aus der psychischen Situation des Probanden, aus der Tageszeit oder aus klimatischen Bedingungen resultieren. Beim Nervensystem wurde festgestellt, daß ein gewisses "Rauschen" stets vorhanden ist. Darunter wird ein "allgemeiner Hintergrund spontaner Tätigkeit" verstanden. Ein auf das Sensorium wirkender Reiz muß vor diesem Hintergrund erkannt werden (8).

Eine Wertung der Faktoren, die möglicherweise die Schwellenmessungen beeinflussen, ist in vielen Fällen ausgeschlossen. In ihrer Gesamtheit bieten sie sich als Erklärung für Unregelmäßigkeiten an, die bei den Messungen beobachtet wurden. Dies gilt besonders für die intraindividuellen Schwankungen der Messungen, also für die Streuung der Meßwerte bei einem Probanden.

Aus den vorliegenden Untersuchungen im Oberkiefer ergeben sich für die Leerwerte der Berührschwellen Mittelwerte, die bei den mittleren Schneidezähnen zwischen 7,68 mN und

17,42 mN, bei den seitlichen Schneidezähnen zwischen 9,50 mN und 21,46 mN und bei den ersten Prämolaren zwischen 6,57 mN und 29,11 mN liegen. Die entsprechenden Mittelwerte der Druckschwellen liegen zwischen 19,47 mN und 56,35 mN, 19,16 mN und 45,02 mN, 12,42 mN und 65,21 mN. Diese Zahlen zeigen deutlich die starken, interindividuellen Schwankungen, die auch von Jenz (43) und Herholz (40) beobachtet wurden. Sie lassen eine Berechnung von repräsentativen Mittelwerten für die jeweiligen Zähne, wie dies einige Autoren getan haben, unangebracht erscheinen (vgl. S. 45 f.).

Ein Vergleich mit den von anderen Autoren ermittelten Schwellenwerten ist nicht unproblematisch. Besondere Bedeutung kommt hier der Kraftanstiegsgeschwindigkeit zu, die bei Berührschwellenmessungen benutzt wird. Jenz (43) erkannte, daß sie die Schwellen stark beeinflußt. Dies wird von van Steenberghe und de Vries bestätigt (78). Allerdings stellten sie die umgekehrte Wirkung einer Geschwindigkeitsänderung fest. Während Jenz beobachtete, daß die Berührschwelle mit zunehmender Kraftanstiegsgeschwindigkeit stieg, kamen van Steenberghe und de Vries zu dem Ergebnis, daß die niedrigste Schwelle von der schnellsten Kraftanstiegsgeschwindigkeit bewirkt wurde. Auf jeden Fall sind die von verschiedenen Autoren angegebenen Schwellenwerte nur dann vergleichbar, wenn die angewandte Kraftanstiegsgeschwindigkeit bekannt ist. Sie konnte aber in vielen Fällen mit Sicherheit nicht genau bestimmt und konstant gehalten werden. Dies gilt zum Beispiel für die Messungen mit von Frey'schen Reizhaaren, wie sie von Skramlik (76) benutzte, oder für das von Loewenstein und Rathkamp angewandte Federästhesiometer (58).

Dennoch seien unter Hinweis auf die genannten Vorbehalte einige von anderen Autoren gemessene Schwellenwerte zum Vergleich hier angeführt. Die angegebenen Werte sind in mN umgerechnet. Loewenstein und Rathkamp ermittelten für die mittleren Oberkieferschneidezähne eine taktile Schwelle von 9,29 mN ± 1,01 mN, für die seitlichen Schneidezähne von 10,73 mN ± 1,52 mN. Die mittleren Schneidezähne haben nach Linden (55) eine Schwelle von 15,11 mN. Jenz (43) kam zu dem Ergebnis, daß die Schwelle der mittleren Schneidezähne zwischen 5,66 mN und 27,50 mN, die der seitlichen Schneidezähne zwischen 7,50 mN und 31,00 mN liegt.

Die Ergebnisse von Herholz (40) sind mit unseren Ergebnissen vergleichbar. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden die Messungen an den Oberkieferschneidezähnen mit einer Kraftanstiegsgeschwindigkeit von 1,8 mN/s durchgeführt. Herholz benutzte eine Kraftanstiegsgeschwindigkeit von 2,0 mN/s. Nachstehend werden die Ergebnisse von Herholz den eigenen gegenübergestellt.

		Herholz	eigene Ergebnisse
Mittlere Schneidezähne	Berührschwelle	4,10 mN - 28,85 mN	7,68 mN - 17,42 mN
	Druckschwelle	15,58 mN - 56,31 mN	19,47 mN - 56,35 mN
seitliche Schneidezähne	Berührschwelle	8,15 mN - 29,53 mN	9,50 mN - 21,46 mN
	Druckschwelle	15,59 mN - 66,33 mN	19,16 mN - 45,02 mN

Die Messungen der Berühr- und Druckschwellen an den Oberkieferschneidezähnen 11, 12, 21 und 22, die unter der Belastung eines oder zweier benachbarter Zähne der gleichen Zahngruppe durchgeführt wurden, zeigten eine deutliche Beeinflussung der Schwellen im Sinne einer Erhöhung. Bereits die Belastung eines Nachbarzahnes mit 10 mN, einer Kraft, die mit einer Ausnahme unter der Berührschwelle der belasteten Zähne lag, führte zu einer in allen Fällen signifikanten Erhöhung der Berühr- und der Druckschwellen (s. S. 60 ff.). Diese Beobachtung weist auf besonders feine Mechanismen der Tastsensibilität der Zähne hin. Mit steigender Belastung, einmal in der Reihe 10 mN, 20 mN,100 mN, das andere Mal in der Reihe 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN, nahmen auch die Schwellen zu. Wurden zwei Zähne belastet, erhöhten sich die Schwellen nochmals gegenüber den Werten unter Belastung eines Zahnes. Es spielte erstaunlicherweise keine Rolle, ob bei der Belastung eines Zahnes die nacheinander angewandten Belastungen 10 mN, 20 mN und 100 mN, oder 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN betrugen. In beiden Fällen war mit zunehmender Belastung ein Anstieg der Schwellen zu beobachten. Dabei führte die Belastungsreihe mit den geringeren Kräften zu ähnlichen Schwellenerhöhungen wie die andere Reihe. Die beiden Schwellenanstiege verlaufen ungefähr gleich steil. Die Schwellen bei 100 mN Belastung, die nach den vorausgegangenen Belastungen mit 10 mN und 20 mN erreicht wurden, entsprachen also nicht den Schwellen bei 100 mN Belastung, wenn diese die erste Laststufe darstellten. Vielmehr wurden in der Reihe 10 mN, 20 mN, 100 mN unter der Belastung mit 100 mN Schwellenwerte gemessen, die bei dem anderen Versuch zum Teil bei 200 mN, häufig erst bei 1000 mN Belastung zu finden sind. Das bedeutet also, daß als Endstufen beider Versuchsreihen unter dem Einfluß einer Belastung von 100 mN ungefähr gleiche Berühr-

und Druckschwellenwerte entstanden wie unter dem Einfluß von 1000 mN.

Wie der gleichartige Schwellenanstieg bei den zwei Versuchen erklärt werden kann, ist unklar.

Innerhalb der Frontzahngruppe konnte keine Bedeutung der Entfernung des gemessenen Zahnes vom belasteten Zahn nachgewiesen werden. Die Zugehörigkeit zweier untersuchter Zähne zu zwei verschiedenen Kieferhälften hatte ebenfalls keinen Einfluß auf die Wirkung der ausgeübten Belastung. Die Belastung der linken hatte für die Schwellen der rechten Schneidezähne eine Zunahme zur Folge und umgekehrt. Wurde der seitliche Schneidezahn belastet, führte dies beim mittleren Schneidezahn zu Schwellenerhöhungen. Das entsprechende gilt bei vertauschten Rollen. Es scheint, als hätte die Belastung eines mittleren Schneidezahnes eine etwas stärkere Wirkung auf die Schwellen der übrigen drei Zähne als die Belastung eines seitlichen Schneidezahnes, bei dem sich die Entfernung zu den Zähnen der anderen Kieferhälfte bemerkbar machen könnte (s. S. 55ff.).

Der Anstieg der Berühr- und Druckschwellen bei Krafteinwirkung an einem benachbarten Zahn stellt eine verringerte Leistungsfähigkeit der Mechanoperzeption, des Wahrnehmungsvermögens für Druck- und Berührungskräfte dar. Eine direkte Beeinflussung der parodontalen Mechanorezeptoren in Form einer Verminderung ihrer Leistungsfähigkeit darf wohl ausgeschlossen werden. Ebenso ist davon auszugehen, daß ein Kraftreiz am benachbarten Zahn bei den Mechanorezeptoren des gemessenen Zahnes keine Erhöhung der Membranpotentiale im Sinne einer Akkomodation bewirkt. Dies würde einen verstärkten Reiz erforderlich machen, um die Reizschwelle der Rezeptoren zu erreichen.

Welche Mechanismen den geschilderten Beobachtungen letztlich zugrunde Liegen, ist noch nicht geklärt. Einige Faktoren, die eine Bedeutung haben könnten, sollen erörtert werden.

Die Vorgänge der neuronalen Informationsübertragung und -auslese werden entscheidend von Hemmungsmechanismen beeinflußt. Ein Organisationsprinzip des Nervensystems besteht darin, daß ein zentrales Erregungsgebiet von einem breiten Hemmungssaum umgeben ist (8, 50, 54, 60). Die Ausdehnung des Hemmungsgebietes soll mit zunehmender Reizstärke größer werden (8), während sich das zentrale Erregungsgebiet gleichzeitig verkleinert (60). Es handelt sich hierbei um das Phänomen der lateralen Hemmung. Dabei werden schwächere Reize gehemmt, so daß der stärkere Reiz besser erkannt werden kann. Verschiedene Autoren konnten hemmende Einflüsse auf parodontale Neurone durch Reizung anderer Regionen feststellen (3, 16, 73; vgl. S. 17). Auf solche Hemmungsmechanismen könnten die beobachteten Schwellenerhöhungen im Frontzahnbereich zurückzuführen sein.

Starkie und Stewart (77) fanden an vier von sechs sezierten menschlichen Unterkiefern eine die Mittellinie überschreitende Innervierung der Frontzähne, die nicht über den seitlichen Schneidezahn hinausging. Anderson und Pearl (4) stellten bei Katzen sowohl im Oberkiefer als auch im Unterkiefer eine auf die Gegenseite übergreifende Innervierung fest, die auch noch den Caninus einschloß. Eine solche, über die Mittellinie hinausgehende Innervierung könnte die Hemmwirkung auf der kontralateralen Seite erklären, also beispielsweise die Schwellenerhöhungen am Zahn 22 unter Belastung des Zahnes 12. Für eine Doppel-

innervation der Oberkieferfrontzähne beim Menschen konnte in der Literatur kein Hinweis gefunden werden. Sollte sie tatsächlich nicht bestehen, dann müßte die Hemmwirkung auf der Gegenseite eine allein zentral gesteuerte Ursache haben.

Jerge (44), Hannam (33) und andere Autoren berichten, daß mehrere benachbarte Zähne von einem sensorischen Neuron innerviert werden können (s. S. 15). Dies läßt vermuten, daß die Reizung zweier solcher Zähne zu konkurrierenden Impulsen im Neuron führt, von denen nur der stärkere weitergeleitet wird.

Hannam (34) äußert sich zu der Beobachtung von Bonaguro et al. (11), daß der optimale Kraftunterscheidungsbereich menschlicher, mittlerer Oberkieferschneidezähne trotz Schwellen in der Größenordnung von 1 g bei Kräften zwischen 50 g und 500 g liegt. Er hält es für möglich, daß die komplizierte Organisation der rezeptiven Felder und die unterschiedlichen Richtungsempfindlichkeiten der parodontalen Mechanorezeptoren bei geringen Reizstärken zu kollidierenden Neuronenaktivitäten im Zentralnervensystem führen. Es wäre nach seinen Ausführungen denkbar, daß dadurch die gesamte Informationsübertragungskapazität des Systems verringert wird. Dieser Effekt könnte durch eine Doppelinnervation verstärkt werden.

Hannam und Farnsworth (35) sind der Meinung, daß die von den parodontalen Mechanorezeptoren aufgenommene und über die angeschlossenen Neuronen weitergegebene Menge an Information die Fähigkeiten des Zentralnervensystems, solche Angaben wahrzunehmen, weit übersteigt.

Der Schaltmechanismus an den Synapsen unterliegt nach einer von Barlow (6) beschriebenen Hypothese dem Prinzip, die eingegangenen Signale so zu recodieren, daß ihre Fülle reduziert, ihr Informationsgehalt aber möglichst aufrechterhalten wird. Das Kriterium der Informationsweitergabe ist nach dieser Hypothese die Antwort auf die Frage, ob das gerade angekommene Signal eine neue Information enthält oder nicht. Entsprechend der jeweiligen Antwort wird es als überflüssig abgelehnt oder als Neuigkeit weitergeleitet. Wenn nun unter der Belastung eines Zahnes die Fähigkeit eines benachbarten Zahnes, Kräfte im Schwellenbereich wahrzunehmen, durch laterale Hemmung vermindert wird, und eine die Kiefermitte übergreifende Frontzahninnervation diesen Effekt verstärkt, würde das im Sinne der Barlow'schen These bedeuten, daß das Zentralnervensystem unter den gegebenen Bedingungen nicht mehr in der Lage ist zu unterscheiden, ob die eingehende Information neu oder schon vorhanden ist. Nicht die Mechanorezeptoren am gemessenen Zahn ändern also ihre Fähigkeiten, sondern die Bereichseinstellung im wahrnehmenden System wird verändert (64).

Die Beobachtung, daß mit der Belastungsreihe 10 mN, 20 mN und 100 mN ähnliche Wirkungen hervorgerufen wurden wie mit der Reihe 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN, ist schwer zu deuten. Offensichtlich spielt es im Bereich der bei diesen Versuchen angewandten Belastungen keine Rolle, wie die ansteigenden Kräfte gewählt wurden. Entscheidend war die Störung der Schwellenempfindung durch die Belastung eines Nachbarzahnes. Dies gilt wohl auch für die Tatsache, daß eine Belastung von 10 mN, die mit einer Ausnahme kleiner war als die Berührschwelle der belasteten Zähne, bereits eine Schwellenerhöhung bewirkte. Warum beide Belastungsreihen trotz unterschiedlicher Kräfte einen ähn-

lichen Schwellenzuwachs verursachten, ist unklar.

Bei einigen Versuchsreihen war zu sehen, daß die Schwellenerhöhung nicht kontinuierlich entsprechend der ansteigenden Belastung des Nachbarzahnes erfolgte. Wie schon erwähnt wurde, sind diese Unregelmäßigkeiten auf das Zusammenwirken mehrerer Faktoren zurückzuführen, zu denen das bereits diskutierte Rauschen, das besonders auf Messungen im Schwellenbereich einwirkt, vorübergehende Konzentrationsschwierigkeiten des Probanden und nicht immer ganz auszuschließende, exogene Einflüsse zu zählen sind (s. S. 73 f.).

Die abermalige Schwellenerhöhung bei der Belastung von zwei benachbarten Zähnen gegenüber der eines Nachbarzahnes ist als Summation der beiden Hemmwirkungen, die von den zwei belasteten Zähnen ausgehen, zu deuten.

Bei einem weiteren Versuch wurde der Abstand zwischen gemessenem und belastetem Zahn größer gewählt. Die Messungen erfolgten an den ersten Prämolaren des Oberkiefers, die Belastungen jeweils am Eckzahn der anderen Kieferhälfte. Unter diesen Bedingungen konnte kein Einfluß einer zunehmenden Belastung auf die Schwellen der Prämolaren festgestellt werden. Die Zähne liegen offenbar so weit voneinander entfernt, daß eine vom Eckzahn ausgehende Hemmwirkung für das Schwellenverhalten des Prämolaren der Gegenseite keine Bedeutung hat.

Die zuvor geschilderten Beobachtungen treffen nur auf nahe beieinander stehende Zähne zu. Offensichtlich gibt es auch bei den Zähnen eine Art Raumschwelle, die einen bestimmten Abstand zweier Zähne verlangt, um unabhängige Empfindungen an ihnen auslösen zu können.

Die Ergebnisse der geschilderten Versuche zeigen deutlich, daß es sich bei den Mechanismen, die die Berühr- und Druckschwellen menschlicher Zähne beeinflussen, um subcortikale, außerhalb des Bewußtseins ablaufende Vorgänge handelt.

Ein Versuch, der das Schwellenverhalten im Anschluß an die Belastung des zu messenden oder eines benachbarten Zahnes aufklären sollte, führte unter den gegebenen Bedingungen zu keinem eindeutigen Resultat (s. S. 68 ff.). Es gab Meßreihen, die einen Einfluß der vorausgegangenen Belastung im Sinne einer Erhöhung der Schwellen erkennen ließen, und andere, bei denen dies nicht der Fall war. Wahrscheinlich war die gewählte Belastung (1000 mN für 30 s) nicht groß genug, um einen eindeutigen Effekt hervorzurufen (vgl. Jenz, 43).

Die parodontalen Mechanorezeptoren bedürfen für ihre Erregung der Zähne als Vermittler. Damit treten die Bedeutungen einer korrekten Okklusion und Artikulation und hierin einer korrekten Kauflächengestaltung in den Vordergrund. Okklusions- und Artikulationshindernisse können durch Über- und Fehlbelastung des Parodontiums zu bleibenden Schäden an den betroffenen Zähnen führen. Darüber hinaus veranlassen sie den Patienten zu Parafunktionen, die unter psychischen Belastungen noch verstärkt werden (23, 69). Die Parafunktionen steigern die Über- und Fehlbelastungen des Parodontiums und damit der Mechanorezeptoren, die durch die geschilderten Hemmungsmechanismen Schwellenerhöhungen an benachbarten Zähnen bewirken. Diese höheren Schwellen bereiten nun den Boden für Über- und Fehlbelastungen auch an den Nachbar-

zähnen. Auf solche Weise kann ein circulus vitiosus entstehen, der schließlich bleibende Schäden im gesamten stomatognathen System zur Folge hat.

Mit der vorliegenden Arbeit wurde versucht, einen Beitrag zu den Bemühungen um die Erweiterung der Kenntnisse über die Physiologie der parodontalen Mechanorezeptoren zu leisten. Sie bestätigt die Bedeutung dieser Rezeptoren im Funktionsgefüge des stomatognathen Systems.

VIII. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit soll dazu beitragen, die Kenntnisse über die Physiologie der parodontalen Mechanorezeptoren des Menschen zu erweitern. Das Verhalten der Berühr- und Druckschwellen von Oberkieferfrontzähnen und oberen ersten Prämolaren wurde unter dem Einfluß von Kräften untersucht, die während Schwellenmessungen auf benachbarte Zähne einwirkten. Die Versuche wurden an jeweils drei Probanden im Alter zwischen 20 und 25 Jahren durchgeführt.

Die Schwellenmessungen erfolgten mit dem "federgefesselten Drehschwinger", der sich für diese Aufgabe bewährt hat. Er ermöglicht es, den Meßfühler nahezu prellfrei auf einen Zahn aufzusetzen und ist in der Lage, Beeinflussungen der Messung durch geringe, physiologische Kopfbewegungen zu vermeiden. Die Kraftanstiegsgeschwindigkeit kann variabel eingestellt und dann konstant gehalten werden. Zur elektronischen Kraftmessung dienten piezo-resistive Halbleiterelemente und Dehnmeßstreifen.

Die Ergebnisse bestätigen, daß die Schwellenwahrnehmung an Zähnen als "sensorisches Intervall" zu beschreiben ist. Es können eine Berühr- und eine Druckschwelle unterschieden werden. Die Mittelwerte der Berührschwellen lagen bei den mittleren Schneidezähnen zwischen 7,68 mN und 17,42 mN, bei den seitlichen Schneidezähnen zwischen 9,50 mN und 21,46 mN und bei den ersten Prämolaren zwischen 6,57 mN und 29,11 mN. Die entsprechenden Druckschwellenmittelwerte lagen zwischen 19,47 mN und 56,35 mN, 19,16 mN und 45,02 mN, 12,42 mN und 65,21 mN.

Die Berühr- und Druckschwellen der Oberkieferschneidezähne werden durch die Belastung eines oder zweier benachbarter Zähne der gleichen Zahngruppe erhöht. Schon eine Belastung mit 10 mN, einer Kraft, die mit einer Ausnahme unter der Berührschwelle der belasteten Zähne lag, bewirkte eine signifikante Schwellenerhöhung. Steigende Belastungen erhöhen die Schwellen, die Belastung zweier Zähne verstärkt diesen Effekt.

Ein Einfluß der Entfernung des gemessenen vom belasteten Zahn konnte bei den Schneidezähnen nicht nachgewiesen werden. Die Belastung eines seitlichen Schneidezahnes scheint auf die anderen drei Zähne schwächer zu wirken als die Belastung eines mittleren Schneidezahnes.

Zwischen dem ersten Oberkieferprämolaren und dem Eckzahn der anderen Kieferhälfte konnte kein Einfluß einer zunehmenden Belastung auf die Schwellen festgestellt werden. Dies weist darauf hin, daß es auch bei den Zähnen eine Art Raumschwelle gibt, deren Überschreitung erst unabhängige Empfindungen an zwei Zähnen ermöglicht.

Verschiedene Faktoren, die möglicherweise die Schwellenmessungen beeinflussen und die beobachteten inter- und intraindividuellen Schwankungen erklären könnten, werden diskutiert.

IX. ANHANG: TABELLEN DER VERSUCHSERGEBNISSE

Tabelle 1: Leerwerte der Berühr- und Druckschwellen. Mittelwerte und Standardabweichungen. (N: Nummer der Meßreihe, P: Proband, Z: Zahn B/D: Berühr- oder Druckschwelle, M: Mittelwert in mN, S: Standardabweichung in mN).

N	P	Z	B/D	M	S
1	1	11	B	9,92	7,77
2		11	D	35,30	6,81
3		12	B	10,78	1,91
4		12	D	30,25	4,48
5		21	B	8,09	3,56
6		21	D	29,99	5,76
7		22	B	14,83	4,76
8		22	D	41,88	4,15
9	2	11	B	16,68	4,61
10		11	D	34,03	5,55
11		11	B	15,33	3,78
12		11	D	36,47	4,03
13		11	B	20,26	2,75
14		11	D	48,06	4,35
15		12	B	16,75	2,52
16		12	D	38,26	4,09
17		12	B	17,61	2,38
18		12	D	42,09	3,57
19		21	B	14,39	2,97
20		21	D	38,65	6,31
21		21	B	16,31	3,60

N	P	Z	B/D	M	S
22	2	21	D	34,19	5,62
23		22	B	16,56	3,32
24		22	D	38,43	5,55
25	3	11	B	12,77	3,55
26		11	D	32,61	5,20
27		12	B	14,66	2,40
28		12	D	34,68	1,98
29		21	B	13,64	2,88
30		21	D	38,10	6,47
31	4	21	B	9,16	2,13
32		21	D	26,93	3,05
33		22	B	11,23	2,58
34		22	D	30,30	1,83
35	5	11	B	9,07	4,90
36		11	D	18,46	5,51
37		11	B	10,01	4,86
38		11	D	29,79	5,60
39		11	B	6,54	2,69
40		11	D	18,59	4,73
41		11	B	8,88	2,33
42		11	D	17,71	3,28
43		11	B	5,69	2,00
44		11	D	13,77	1,99
45		11	B	12,63	2,63
46		11	D	30,79	7,27

N	P	Z	B/D	M	S
47	5	12	B	12,23	3,42
48		12	D	35,87	13,60
49		12	B	9,61	4,59
50		12	D	29,65	6,29
51		12	B	7,64	3,05
52		12	D	28,65	6,39
53		12	B	11,39	2,86
54		12	D	23,30	2,22
55		21	B	9,88	2,37
56		21	D	23,66	4,64
57		21	B	7,25	3,55
58		21	D	19,70	4,89
59		21	B	6,73	2,61
60		21	D	19,84	2,98
61		21	B	8,49	2,68
62		21	D	16,14	4,85
63		21	B	9,72	3,09
64		21	D	17,94	3,64
65		22	B	9,66	1,92
66		22	D	19,97	3,64
67		22	B	8,67	3,44
68		22	D	18,73	3,65
69		22	B	10,74	3,00
70		22	D	20,25	3,49
71		22	B	8,99	2,39

N	P	Z	B/D	M	S
72	5	22	D	17,84	4,95
73	6	11	B	11,32	3,38
74		11	D	21,46	4,47
75		11	B	14,93	3,73
76		11	D	35,80	4,30
77		11	B	13,49	3,37
78		11	D	34,38	4,68
79		12	B	14,47	7,57
80		12	D	49,93	10,71
81		12	B	18,32	5,90
82		12	D	38,51	6,33
83		12	B	19,58	5,98
84		12	D	41,73	6,14
85		21	B	11,38	4,02
86		21	D	27,18	8,50
87		21	B	13,72	2,54
88		21	D	33,20	4,77
89		21	B	13,17	3,27
90		21	D	35,90	4,43
91		22	B	24,98	10,70
92		22	D	55,18	7,74
93		22	B	17,58	3,93
94		22	D	40,20	6,91
95		22	B	12,81	2,06
96		22	D	38,38	5,04
97	7	11	B	10,99	3,68

N	P	Z	B/D	M	S
98	7	11	D	21,89	4,18
99		11	B	8,59	1,60
100		11	D	18,63	3,12
101		11	B	13,35	2,60
102		11	D	23,81	2,73
103		11	B	9,40	2,96
104		11	D	17,79	3,05
105		11	B	11,06	4,22
106		11	D	20,89	5,25
107		12	B	21,44	5,69
108		12	D	38,66	5,22
109		12	B	7,55	2,89
110		12	D	18,10	3,68
111		12	B	18,70	4,30
112		12	D	31,83	4,02
113		12	B	11,69	4,04
114		12	D	23,88	4,13
115		12	B	23,71	4,47
116		12	D	37,06	3,98
117		21	B	8,18	3,19
118		21	D	28,03	4,46
119		21	B	7,80	2,57
120		21	D	17,07	3,28
121		21	B	10,43	2,94
122		21	D	19,77	2,18
123		21	B	7,47	2,52

N	P	Z	B/D	M	S
124	7	21	D	15,56	2,93
125		21	B	13,31	5,08
126		21	D	25,54	5,14
127		22	B	20,49	3,70
128		22	D	38,40	3,18
129		22	B	11,92	3,20
130		22	D	20,23	3,83
131		22	B	17,36	3,90
132		22	D	29,56	2,45
133		22	B	8,46	3,13
134		22	D	17,97	2,28
135		22	B	23,85	4,54
136		22	D	35,96	3,77
137	3	14	B	12,74	2,77
138		14	D	20,68	3,29
139		24	B	12,12	4,28
140		24	D	21,55	5,50
141	7	14	B	9,54	2,16
142		14	D	17,85	2,62
143		24	B	6,57	2,67
144		24	D	12,42	2,91
145	8	14	B	29,11	7,75
146		14	D	65,21	7,12
147		24	B	22,88	7,12
148		24	D	46,52	6,08

Tabelle 2: Leerwerte der Berühr- und Druckschwellen. Gesamtmittelwerte aus an verschiedenen Tagen aufgenommenen Meßreihen und Standardabweichungen (N: Nummer der Meßreihe, P: Proband, Z: Zahn, B/D: Berühr- oder Druckschwelle, M: Mittelwert in mN, S: Standardabweichung in mN).

N	P	Z	B/D	M	S
149	5	11	B	8,82	4,08
150		11	D	21,35	7,97
151		12	B	10,20	3,85
152		12	D	29,50	9,24
153		21	B	8,36	3,07
154		21	D	19,47	4,78
155		22	B	9,50	2,75
156		22	D	19,16	3,98
157	6	11	B	13,30	3,71
158		11	D	30,72	7,83
159		12	B	17,39	6,70
160		12	D	43,44	9,24
161		21	B	12,76	3,38
162		21	D	32,09	7,04
163		22	B	18,43	8,11
164		22	D	44,45	9,94
165	7	11	B	10,67	3,45
166		11	D	20,62	4,25
167		12	B	16,62	7,41
168		12	D	29,96	8,90
169		21	B	9,36	3,90

N	P	Z	B/D	M	S
170	7	21	D	32,96	23,49
171		22	B	21,46	14,19
172		22	D	28,42	8,87

Tabelle 3: Vergleich der Berühr- und Druckschwellenleerwerte. U-Test von Mann und Whitney. (N_1, N_2: Nummern der verglichenen Meßreihen - siehe Tabelle 2-, U: U-Wert, Z: Z-Wert, E: Ergebnis des Vergleichs, sig.: signifikanter Unterschied, -: kein signifikanter Unterschied).

N_1	N_2	U	Z	E
149	151	1140,5	-1,980	sig
149	153	1811,0	0,047	-
149	155	1192,0	-1,485	-
151	153	768,0	2,464	sig
151	155	756,5	0,952	-
153	155	833,0	-1,803	-
150	152	661,5	-4,859	sig
150	154	1742,0	0,404	-
150	156	1327,5	0,657	-
152	154	216,5	6,659	sig
152	156	158,5	6,399	sig
154	156	1009,0	0,441	-
157	161	474,5	0,497	-
157	163	282,0	-2,795	sig
157	159	309,0	-2,571	sig
161	163	264,5	-3,319	sig
161	159	295,5	-3,051	sig
163	159	492,0	0,055	-
158	162	477,5	-0,457	-
158	164	127,0	-4,977	sig
158	160	145,5	-4,819	sig

N_1	N_2	U	Z	E
162	164	153,5	-4,809	sig
162	160	166,5	-4,744	sig
164	160	469,5	0,364	-
165	169	1093,5	2,103	sig
165	171	645,5	-4,690	sig
165	167	727,0	-4,279	sig
169	171	509,5	-5,475	sig
169	167	593,0	-5,031	sig
171	167	1196,0	0,858	-
166	170	1009,0	-2,630	sig
166	172	721,0	-4,317	sig
166	168	534,5	-5,496	sig
170	172	1211,0	-1,070	-
170	168	1081,0	-1,904	-
172	168	1220,0	-0,858	-

Tabelle 4: Berühr- und Druckschwelle unter dem Einfluß der Belastung eines benachbarten Zahnes mit 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN.
Mittelwerte und Standardabweichungen.
(N: Nummer der Meßreihe, P: Proband, gZ: gemessener Zahn, bZ: belasteter Zahn, B: Belastung in mN, B/D: Berühr- oder Druckschwelle, M: Mittelwerte in mN, S: Standardabweichungen in mN).

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
173	5	11	12	100	B	15,20	9,89
174				100	D	32,26	12,90
175				200	B	19,98	7,94
176				200	D	44,78	6,34
177				500	B	18,82	6,38
178				500	D	38,90	6,62
179				1000	B	18,28	5,43
180				1000	D	45,93	5,26
181		11	21	100	B	18,36	4,07
182				100	D	35,92	8,52
183				200	B	18,40	12,34
184				200	D	36,01	17,64
185				500	B	18,86	11,05
186				500	D	36,92	8,69
187				1000	B	14,59	4,21
188				1000	D	28,74	7,24
189		11	22	100	B	10,97	4,55
190				100	D	28,02	6,14
191				200	B	13,18	3,11
192				200	D	31,14	5,06

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
193	5	11	22	500	B	16,82	9,37
194				500	D	37,81	13,26
195				1000	B	15,31	5,95
196				1000	D	37,82	9,14
197		12	11	100	B	9,04	3,15
198				100	D	27,22	6,67
199				200	B	14,34	6,28
200				200	D	44,72	9,96
201				500	B	14,22	7,10
202				500	D	42,43	7,32
203				1000	B	16,08	4,72
204				1000	D	56,55	8,81
205		12	21	100	B	13,19	6,34
206				100	D	35,55	6,33
207				200	B	10,56	4,27
208				200	D	30,06	11,58
209				500	B	14,29	5,72
210				500	D	41,64	8,21
211				1000	B	18.78	5,59
212				1000	D	53,86	12,09
213		12	22	100	B	11,10	2,79
214				100	D	35,52	7,81
215				200	B	16,48	5,77
216				200	D	42,52	7,40
217				500	B	17,37	5,60
218				500	D	50,10	9,16

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
219	5	12	22	1000	B	19,52	9,22
220				1000	D	64,13	9,79
221		21	22	100	B	11,63	5,42
222				100	D	26,84	4,68
223				200	B	14,38	2,83
224				200	D	32,00	3,91
225				500	B	16,74	5,19
226				500	D	37,38	8,79
227				1000	B	22,96	5,96
228				1000	D	47,44	6,22
229		21	11	100	B	13,77	4,35
230				100	D	33,17	6,36
231				200	B	14,31	6,85
232				200	D	36,58	5,29
233				500	B	16,92	8,10
234				500	D	42,32	6,92
235				1000	B	16,64	4,93
236				1000	D	49,98	5,65
237		21	12	100	B	16,87	2,76
238				100	D	34,45	6,47
239				200	B	17,88	4,35
240				200	D	40,13	8,77
241				500	B	19,49	5,97
242				500	D	39,55	11,97
243				1000	B	14,76	4,49
244				1000	D	38,34	4,80

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
245	5	22	21	100	B	14,06	3,82
246				100	D	28,74	4,58
247				200	B	16,51	5,13
248				200	D	32,96	5,69
249				500	B	20,13	3,70
250				500	D	41,68	7,27
251				1000	B	24,87	6,75
252				1000	D	51,24	7,29
253		22	11	100	B	10,13	6,29
254				100	D	23,21	5,95
255				200	B	12,81	7,44
256				200	D	32,01	10,46
257				500	B	8,41	3,04
258				500	D	29,28	8,38
259				1000	B	14,52	4,11
260				1000	D	39,58	10,23
261		22	12	100	B	10,20	4,10
262				100	D	25,46	4,16
263				200	B	15,14	3,98
264				200	D	30,30	5,64
265				500	B	15,34	3,86
266				500	D	33,48	7,43
267				1000	B	20,49	5,73
268				1000	D	45,24	8,33
269	6	11	12	100	B	32,68	13,04

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
270	6	11	12	100	D	55,76	15,25
271				200	B	36,09	14,78
272				200	D	62,96	14,74
273				500	B	26,61	6,81
274				500	D	47,43	16,41
275				1000	B	26,22	8,02
276				1000	D	49,60	12,12
277		11	21	100	B	20,02	8,76
278				100	D	60,92	12,90
279				200	B	24,89	10,15
280				200	D	55,27	9,34
281				500	B	21,87	7,47
282				500	D	60,00	11,84
283				1000	B	22,52	7,41
284				1000	D	59,94	10,97
285		11	22	100	B	20,38	5,69
286				100	D	56,82	10,93
287				200	B	20,22	5,84
288				200	D	55,70	7,43
289				500	B	22,93	7,21
290				500	D	54,16	6,60
291				1000	B	17,73	5,56
292				1000	D	55,26	8,12
293		12	11	100	B	31,16	7,65
294				100	D	63,94	8,66
295				200	B	55,56	9,93

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
296	6	12	11	200	D	77,76	7,46
297				500	B	48,40	10,27
298				500	D	76,12	6,43
299				1000	B	56,78	9,89
300				1000	D	81,98	7,87
301		12	21	100	B	23,56	5,89
302				100	D	60,11	6,11
303				200	B	28,66	10,59
304				200	D	55,18	8,45
305				500	B	29,78	12,08
306				500	D	61,18	9,27
307				1000	B	29,48	5,26
308				1000	D	67,54	11,21
309		12	22	100	B	19,92	10,27
310				100	D	47,96	7,25
311				200	B	25,51	9,25
312				200	D	52,87	6,60
313				500	B	27,88	10,03
314				500	D	51,82	9,79
315				1000	B	22,44	7,51
316				1000	D	56,74	7,81
317		21	22	100	B	22,32	8,71
318				100	D	45,23	15,97
319				200	B	28,22	10,91
320				200	D	50,42	16,77
321				500	B	28,49	13,19
322				500	D	50,23	13,69

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
323	6	21	22	1000	B	27,58	8,93
324				1000	D	48,68	14,65
325		21	11	100	B	40,71	10,97
326				100	D	68,98	13,42
327				200	B	41,22	9,18
328				200	D	66,11	11,50
329				500	B	38,04	4,67
330				500	D	69,66	7,13
331				1000	B	40,08	9,20
332				1000	D	72,60	7,20
333		21	12	100	B	28,59	9,50
334				100	D	52,54	12,74
335				200	B	29,47	5,86
336				200	D	63,33	8,23
337				500	B	32,40	10,36
338				500	D	60,24	13,58
339				1000	B	26,70	8,55
340				1000	D	53,10	7,34
341		22	21	100	B	27,20	5,72
342				100	D	48,23	7,75
343				200	B	36,53	7,95
344				200	D	51,44	6,32
345				500	B	37,07	7,11
346				500	D	57,05	4,41
347				1000	B	44,19	8,76
348				1000	D	65,11	7,80

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
349	6	22	11	100	B	35,30	10,79
350				100	D	67,70	7,92
351				200	B	33,12	6,31
352				200	D	59,06	7,98
353				500	B	28,22	8,63
354				500	D	55,80	7,46
355				1000	B	31,95	8,12
356				1000	D	62,72	6,43
357		22	12	100	B	25,02	13,60
358				100	D	55,81	9,50
359				200	B	30,67	7,78
360				200	D	58,37	9,23
361				500	B	27,40	4,14
362				500	D	53,90	7,93
363				1000	B	41,98	12,19
364				1000	D	69,48	14,07
365	7	11	12	100	B	9,35	5,99
366				100	D	29,40	6,41
367				200	B	22,39	4,42
368				200	D	45,57	7,56
369				500	B	24,33	6,32
370				500	D	49,10	5,90
371				1000	B	34,20	5,14
372				1000	D	56,08	6,17
373		11	21	100	B	31,54	6,24
374				100	D	46,98	4,96

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
375	7	11	21	200	B	40,82	3,76
376				200	D	58,08	4,38
377				500	B	59,46	5,12
378				500	D	68,76	9,98
379				1000	B	44,62	5,23
380				1000	D	83,80	10,75
381		11	22	100	B	24,18	5,58
382				100	D	40,71	5,60
383				200	B	35,12	5,64
384				200	D	54,20	5,58
385				500	B	38,95	7,47
386				500	D	56,75	7,44
387				1000	B	54,89	10,79
388				1000	D	71,86	9,02
389		12	11	100	B	19,94	4,82
390				100	D	40,63	7,03
391				200	B	36,98	5,37
392				200	D	53,01	5,45
393				500	B	43,99	7,18
394				500	D	62,89	9,66
395				1000	B	46,99	2,11
396				1000	D	75,72	4,53
397		12	21	100	B	31,40	8,53
398				100	D	48,82	10,52
399				200	B	42,67	6,93
400				200	D	64,24	7,14

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
401	7	12	21	500	B	47,38	4,11
402				500	D	74,40	4,78
403				1000	B	54,28	4,46
404				1000	D	86,74	7,26
405		12	22	100	B	25,72	3,62
406				100	D	45,12	2,77
407				200	B	29,26	4,24
408				200	D	52,07	3,95
409				500	B	36,62	5,57
410				500	D	56,70	4,08
411				1000	B	60,66	4,59
412				1000	D	82,34	4,93
413		21	22	100	B	27,89	3,08
414				100	D	47,82	3,74
415				200	B	34,88	5,47
416				200	D	55,00	6,58
417				500	B	40,31	5,72
418				500	D	63,55	5,86
419				1000	B	49,46	7,08
420				1000	D	71,40	9,67
421		21	11	100	B	16,98	3,53
422				100	D	32,38	3,60
423				200	B	23,92	5,10
424				200	D	40,73	2,69
425				500	B	27,17	5,37
426				500	D	44,40	5,90

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
427	7	21	11	1000	B	44,57	3,23
428				1000	D	72,58	5,81
429		21	12	100	B	10,16	3,33
430				100	D	28,44	2,37
431				200	B	17,29	3,71
432				200	D	38,51	2,95
433				500	B	22,82	2,29
434				500	D	50,17	3,98
435				1000	B	35,00	4,48
436				1000	D	62,97	4,12
437		22	21	100	B	26,42	5,82
438				100	D	44,88	5,08
439				200	B	40,04	9,82
440				200	D	58,60	8,29
441				500	B	53,22	9,79
442				500	D	78,92	16,34
443				1000	B	46,62	15,48
444				1000	D	85,16	7,99
445		22	11	100	B	16,24	2,62
446				100	D	30,86	3,34
447				200	B	24,76	3,20
448				200	D	43,45	5,59
449				500	B	25,87	4,66
450				500	D	45,69	5,55
451				1000	B	49,16	5,40
452				1000	D	74,36	5,56

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
453	7	22	12	100	B	24,42	4,40
454				100	D	43,16	4,61
455				200	B	20,18	3,77
456				200	D	39,38	4,27
457				500	B	34,60	7,83
458				500	D	53,55	6,71
459				1000	B	34,50	7,65
460				1000	D	53,68	7,07
461	3	14	23	100	B	14,85	3,00
462				100	D	27,32	4,20
463				200	B	15,50	4,30
464				200	D	26,71	3,82
465				500	B	10,00	3,92
466				500	D	20,79	7,20
467				1000	B	11,03	4,26
468				1000	D	24,98	6,30
469		24	13	100	B	17,91	4,77
470				100	D	26,88	3,81
471				200	B	16,94	2,07
472				200	D	27,33	2,97
473				500	B	14,68	3,50
474				500	D	26,15	3,58
475				1000	B	15,90	1,80
476				1000	D	27,97	2,98
477	7	14	23	100	B	9,18	2,20
478				100	D	16,72	2,34

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
479	7	14	23	200	B	9,12	2,17
480				200	D	15,78	2,27
481				500	B	8,00	1,94
482				500	D	14,38	2,26
483				1000	B	9,26	1,61
484				1000	D	15,65	1,96
485		24	13	100	B	8,72	2,30
486				100	D	14,35	1,54
487				200	B	8,95	2,77
488				200	D	14,94	2,56
489				500	B	8,22	2,48
490				500	D	14,91	2,46
491				1000	B	8,03	2,24
492				1000	D	12,72	2,19
493	8	14	23	100	B	36,09	11,33
494				100	D	71,38	10,15
495				200	B	26,99	8,57
496				200	D	60,11	10,85
497				500	B	21,17	3,63
498				500	D	54,20	8,07
499				1000	B	19,17	3,04
500				1000	D	53,98	5,29
501		24	13	100	B	21,85	7,74
502				100	D	46,91	6,53
503				200	B	23,10	5,72

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
504	8	24	13	200	D	49,51	9,06
505				500	B	18,55	4,40
506				500	D	39,77	7,81
507				1000	B	16,53	2,91
508				1000	D	37,26	2,61

Tabelle 5: Berührschwelle und Druckschwelle unter dem Einfluß der Belastung eines Nachbarzahnes. Auswertung mit dem U-Test von Mann und Whitney. (N_1, N_2: Nummern der verglichenen Meßreihen - siehe Tabellen 2 und 4 -, U: U-Wert, Z: Z-Wert, E: Ergebnis des durchgeführten Vergleichs, sig.: signifikanter Unterschied, -: kein signifikanter Unterschied).

N_1	N_2	U	Z	E
149	173	338,0	-2,464	sig
173	175	54,0	-1,370	-
175	177	48,0	0,151	-
177	179	45,0	0,378	-
150	174	289,5	-3,002	sig
174	176	29,5	-2,662	sig
176	178	27,0	1,739	-
178	180	19,0	-2,343	sig
149	181	39,0	-4,525	sig
181	183	39,0	0,832	-
183	185	45,0	-0,378	-
185	187	43,0	0,530	-
150	182	83,5	-3,877	sig
182	184	39,5	0,794	-
184	186	39,0	-0,832	-
186	188	20,0	2,268	sig

N_1	N_2	U	Z	E
149	189	237,0	-1,644	-
189	191	39,0	-0,832	-
191	193	42,0	-0,605	-
193	195	49,0	0,076	-
150	190	170,0	-2,619	sig
190	192	35,5	-1,097	-
192	194	33,5	-1,248	-
194	196	44,0	-0,454	-
151	197	172,5	0,871	-
197	199	25,5	-2,078	sig
199	201	60,0	0,033	-
201	203	40,0	-1,057	-
152	198	166,5	1,010	-
198	200	6,0	-3,450	sig
200	202	56,5	0,263	-
202	204	10,0	-3,169	sig
151	205	143,5	-1,544	-
205	207	39,5	1,092	-
207	209	32,0	-1,620	-
209	211	27,5	-1,702	-
152	206	91,5	-2,752	sig
206	208	38,0	1,198	-
208	210	22,0	-2,324	sig
210	212	18,0	-2,420	sig

N_1	N_2	U	Z	E
151	213	173,0	-0,859	-
213	215	19,5	-2,306	sig
215	217	49,5	-0,387	-
217	219	48,0	-0,493	-
152	214	107,5	-2,380	sig
214	216	25,0	-1,890	-
216	218	25,0	-1,634	-
218	220	12,0	-2,694	sig
153	221	178,5	-1,560	-
221	223	26,0	-1,814	-
223	225	27,5	-1,702	-
225	227	23,0	-2,042	sig
154	222	48,5	-4,049	sig
222	224	19,0	-2,343	sig
224	226	24,5	-1,928	-
226	228	14,0	-2,721	sig
153	229	101,0	-3,630	sig
229	231	65,0	0,062	-
231	233	40,5	-1,022	-
233	235	50,0	0,000	-
154	230	18,0	-5,057	sig
230	232	35,0	-1,648	-
232	234	24,0	-1,965	-
234	236	21,0	-2,192	sig

N_1	N_2	U	Z	E
153	237	10,0	-4,785	sig
237	239	39,5	-1,092	-
239	241	63,5	-0,154	-
241	243	33,0	1,782	-
154	238	13,0	-4,728	sig
238	240	28,0	-1,663	-
240	242	54,0	0,396	-
242	244	59,0	-0,066	-
155	245	66,5	-3,286	sig
245	247	48,0	-0,493	-
247	249	31,0	-1,690	-
249	251	28,0	-1,663	-
156	246	22,5	-4,330	sig
246	248	32,5	-1,585	-
248	250	16,0	-2,746	sig
250	252	18,0	-2,420	sig
155	253	196,5	0,202	-
253	255	40,5	-1,287	-
255	257	27,5	2,144	sig
257	259	9,0	-3,100	sig
156	254	115,5	-2,124	sig
254	256	23,5	-2,407	sig
256	258	51,0	0,593	-
258	260	20,5	-2,232	sig

N_1	N_2	U	Z	E
155	261	186,0	-0,451	-
261	263	20,0	-2,269	sig
263	265	49,0	0,076	-
265	267	27,0	-1,739	-
156	262	60,0	-3,441	sig
262	264	23,0	-2,042	sig
264	266	39,5	-0,794	-
266	268	14,0	-2,721	sig
157	269	24,5	-3,963	sig
269	271	51,0	-0,282	-
271	273	48,0	1,791	-
273	275	76,5	0,311	-
158	270	21,0	-4,068	sig
270	272	41,0	-0,986	-
272	274	33,5	2,544	sig
274	276	71,5	-0,571	-
157	277	77,0	-2,369	sig
277	279	30,5	-1,184	-
279	281	38,0	0,874	-
281	283	54,5	-0,035	-
158	278	2,0	-4,645	sig
278	280	33,0	0,980	-
280	282	39,0	-0,798	-
282	284	52,0	-0,211	-

N_1	N_2	U	Z	E
157	285	49,0	-3,477	sig
285	287	53,0	0,141	-
287	289	39,5	-1,092	-
289	291	32,0	1,871	-
158	286	2,0	-4,821	sig
286	288	33,0	0,141	-
288	290	39,0	0,528	-
290	292	52,0	0,098	-
159	293	29,0	-3,869	sig
293	295	1,0	-3,705	sig
295	297	33,0	1,287	-
297	299	28,0	-1,663	-
160	294	17,0	-4,223	sig
294	296	12,5	-2,837	sig
296	298	40,0	0,757	-
298	300	28,5	-1,626	-
159	301	84,5	-2,547	sig
301	303	44,0	-0,775	-
303	305	49,0	-0,076	-
305	307	50,0	0,000	-
160	302	24,5	-4,217	sig
302	304	29,0	1,831	-
304	306	27,0	-1,740	-
306	308	31,0	-1,437	-

N_1	N_2	U	Z	E
159	309	143,0	-0,502	-
309	311	37,0	-1,268	-
311	313	48,0	-0,494	-
313	315	38,0	0,908	-
160	310	102,0	-1,713	-
310	312	34,0	-1,479	-
312	314	44,5	0,740	-
314	316	31,0	-1,437	-
161	317	56,0	-3,869	sig
317	319	53,0	-1,360	-
319	321	76,0	0,109	-
321	323	73,0	-0,272	-
162	318	87,5	-3,098	sig
318	320	65,0	-0,707	-
320	322	77,0	-0,054	-
322	324	73,0	0,272	-
161	325	0,0	-4,922	sig
325	327	59,0	0,098	-
327	329	39,0	1,127	-
329	331	43,0	-0,530	-
162	326	1,0	-4,892	sig
326	328	52,0	0,558	-
328	330	44,5	-0,740	-
330	332	39,0	-0,832	-

N_1	N_2	U	Z	E
161	333	14,0	-5,694	sig
333	335	101,5	-0,507	-
335	337	62,0	-0,246	-
337	339	43,0	1,416	-
162	334	36,0	-5,273	sig
334	336	52,0	-2,514	sig
336	338	56,0	0,616	-
338	340	48,0	1,108	-
163	341	52,0	-3,127	sig
341	343	14,0	-2,721	sig
343	345	47,0	-0,227	-
345	347	22,5	-2,080	sig
164	342	111,5	-1,321	-
342	344	40,0	-0,756	-
344	346	15,0	-2,648	sig
346	348	20,0	-2,268	sig
163	349	26,5	-3,902	sig
349	351	47,5	0,189	-
351	353	28,0	1,664	-
353	355	36,5	-1,021	-
164	350	12,0	-4,342	sig
350	352	20,5	2,231	sig
352	354	38,5	0,870	-
354	356	24,0	-1,966	-

N_1	N_2	U	Z	E
163	357	149,5	-1,655	-
357	359	57,5	-1,363	-
359	361	42,5	1,155	-
361	363	8,5	-3,139	sig
164	358	90,0	-3,114	sig
358	360	74,5	-0,489	-
360	362	43,0	1,122	-
362	364	20,5	-2,232	sig
165	365	295,0	1,601	-
365	367	12,5	-4,039	sig
367	369	65,5	-0,952	-
369	371	15,5	-3,263	sig
166	366	70,0	-4,874	sig
366	368	11,0	-4,104	sig
368	370	59,5	-1,261	-
370	372	37,5	-1,992	-
165	373	3,0	-4,937	sig
373	375	6,0	-3,331	sig
375	377	0,0	-3,780	sig
377	379	2,0	3,628	sig
166	374	0,0	-4,993	sig
374	376	2,5	-3,595	sig
376	378	23,0	-2,044	sig
378	380	13,0	-2,797	sig

N_1	N_2	U	Z	E
165	381	4,5	-5,118	sig
381	383	9,5	-3,205	sig
383	385	42,0	-0,916	-
385	387	12,0	-3,191	sig
166	382	0,0	-5,197	sig
382	384	5,0	-3,523	sig
384	386	51,5	-0,247	-
386	388	13,0	-3,120	sig
167	389	235,5	-1,316	-
389	391	3,0	-3,760	sig
391	393	18,0	-2,206	sig
393	395	28,5	-1,348	-
168	390	106,0	-3,544	sig
390	392	9,0	-3,364	sig
392	394	14,0	-2,532	sig
394	396	8,0	-3,021	sig
167	397	55,0	-4,183	sig
397	399	17,0	-2,857	sig
399	401	28,0	-1,902	-
401	403	12,5	-2,840	sig
168	398	49,0	-4,291	sig
398	400	12,5	-3,153	sig
400	402	12,0	-3,028	sig
402	404	9,5	-3,063	sig

N_1	N_2	U	Z	E
167	405	75,5	-3,531	sig
405	407	27,5	-1,938	-
407	409	16,5	-2,713	sig
409	411	0,0	-3,781	sig
168	406	18,5	-4,622	sig
406	408	8,5	-3,275	sig
408	410	23,0	-2,253	sig
410	412	0,0	-3,780	sig
169	413	0,0	-5,188	sig
413	415	14,0	-2,897	sig
415	417	24,5	-2,149	sig
417	419	16,5	-2,892	sig
170	414	110,0	-3,230	sig
414	416	20,0	-2,466	sig
416	418	17,5	-2,642	sig
418	420	28,5	-2,103	sig
169	421	39,0	-4,494	sig
421	423	11,0	-3,098	sig
423	425	32,0	-1,361	-
425	427	0,0	-3,781	sig
170	422	154,0	-2,447	sig
422	424	1,0	-3,804	sig
424	426	30,0	-1,512	-
426	428	0,0	-3,780	sig

N_1	N_2	U	Z	E
169	429	219,5	-0,856	-
429	431	8,5	-3,603	sig
431	433	14,0	-3,602	sig
433	435	0,0	-4,161	sig
170	430	191,5	-1,383	-
430	432	0,0	-4,101	sig
432	434	0,0	-4,322	sig
434	436	3,5	-3,958	sig
171	437	142,5	-2,192	sig
437	439	9,0	-3,100	sig
439	441	17,5	-2,458	sig
441	443	35,0	1,135	-
172	438	22,5	-4,546	sig
438	440	4,0	-3,479	sig
440	442	8,0	-3,176	sig
442	444	24,5	-1,928	-
171	445	266,0	0,267	-
445	447	0,0	-3,874	sig
447	449	41,5	-0,643	-
449	451	0,0	-3,780	sig
172	446	261,0	-0,453	-
446	448	1,0	-3,804	sig
448	450	32,0	-1,361	-
450	452	0,0	-3,780	sig

N_1	N_2	U	Z	E
171	453	167,5	-2,082	sig
453	455	29,0	2,068	sig
455	457	4,0	-3,710	sig
457	459	62,0	-0,246	-
172	454	43,0	-4,400	sig
454	456	31,5	1,905	-
456	458	0,0	-3,973	sig
458	460	61,5	-0,277	-
137	461	32,5	-1,585	-
461	463	53,0	-0,141	-
463	465	14,0	2,721	sig
465	467	41,5	-0,643	-
138	462	10,0	-3,169	sig
462	464	50,0	0,352	-
464	466	19,0	2,343	sig
466	468	42,5	-0,567	-
139	469	25,5	-2,666	sig
469	471	47,0	0,564	-
471	473	34,5	1,682	-
473	475	40,0	-1,320	-
140	470	31,0	-2,347	sig
470	472	51,5	-0,247	-
472	474	55,0	0,330	-
474	476	41,5	-1,221	-

N_1	N_2	U	Z	E
141	477	56,5	0,231	-
477	479	45,0	-0,379	-
479	481	35,5	1,097	-
481	483	35,5	-1,097	-
142	478	51,0	0,594	-
478	480	39,0	0,832	-
480	482	31,0	1,437	-
482	484	36,0	-1,061	-
143	485	36,0	-1,800	-
485	487	54,0	0,070	-
487	489	49,5	0,388	-
489	491	49,5	0,038	-
144	486	39,0	-1,615	-
486	488	46,0	-0,635	-
488	490	55,0	0,000	-
490	492	25,5	1,853	-
145	493	32,0	-1,361	-
493	495	24,0	1,715	-
495	497	17,0	1,179	-
497	499	10,0	1,283	-
146	494	33,0	-1,285	-
494	496	18,5	2,165	sig
496	498	17,0	1,179	-
498	500	16,0	0,320	-

N_1	N_2	U	Z	E
147	501	46,0	0,302	-
501	503	43,5	-0,492	-
503	505	23,5	2,004	-
505	507	33,0	1,286	-
148	502	46,0	-0,302	-
502	504	45,5	-0,340	-
504	506	22,0	2,117	sig
506	508	43,0	0,529	-

Tabelle 6: Berührschwelle und Druckschwelle unter gleich starker Belastung verschiedener Nachbarzähne. Möglicher Einfluß der Entfernung des gemessenen vom belasteten Zahn.
Auswertung mit dem U-Test von Mann und Whitney.
(N_1, N_2: Nummern der verglichenen Meßreihen - siehe Tabelle 4 -, U: U-Wert, Z: Z-Wert, E: Ergebnis des durchgeführten Vergleichs, sig.: signifikanter Unterschied, -: kein signifikanter Unterschied).

N_1	N_2	U	Z	E
181	173	54,0	1,370	-
181	189	12,5	2,837	sig
182	174	64,5	0,817	-
182	190	23,0	2,041	sig
183	175	43,5	-0,492	-
183	191	35,0	1,134	-
184	176	18,5	-2,382	sig
184	192	45,5	0,340	-
185	177	41,5	-0,643	-
185	193	42,0	0,605	-
186	178	41,5	-0,643	-
186	194	47,5	0,189	-
187	179	27,0	-1,741	-
187	195	43,5	-0,492	-
188	180	3,0	-3,553	sig
188	196	21,5	-2,155	sig

N_1	N_2	U	Z	E
197	205	27,0	-1,739	-
197	213	32,5	-1,323	-
198	206	15,0	-2,646	sig
198	214	18,5	-2,382	sig
199	207	37,5	1,511	-
199	215	39,0	-1,127	-
200	208	15,0	2,988	sig
200	216	53,5	0,106	-
201	209	54,0	-0,070	-
201	217	41,5	-1,248	-
202	210	52,5	0,176	-
202	218	26,0	-1,785	-
203	211	39,5	-0,795	-
203	219	39,0	-0,832	-
204	212	40,5	0,719	-
204	220	28,5	-1,626	-
237	229	35,5	1,616	-
237	221	18,0	2,419	sig
238	230	54,0	0,396	-
238	222	16,5	2,533	sig

N_1	N_2	U	Z	E
239	231	39,0	1,412	-
239	223	24,5	2,148	sig
240	232	32,0	1,361	-
240	224	22,0	2,117	sig
241	233	46,0	0,924	-
241	225	47,5	0,825	-
242	234	48,0	-0,791	-
242	226	56,0	0,264	-
243	235	40,5	-0,718	-
243	227	14,0	-2,721	sig
244	236	5,0	-3,403	sig
244	228	10,0	-3,025	sig
245	253	19,0	2,344	sig
245	261	20,5	2,231	sig
246	254	21,0	2,192	sig
246	262	30,0	1,512	-
247	255	31,0	2,155	sig
247	263	45,5	0,669	-
248	256	52,5	0,831	-
248	264	44,5	0,740	-

N_1	N_2	U	Z	E
249	257	0,0	3,780	sig
249	265	20,0	2,268	sig
250	258	14,0	2,721	sig
250	266	20,0	2,268	sig
251	259	5,0	3,403	sig
251	267	28,5	1,626	-
252	260	11,5	2,914	sig
252	268	30,5	1,475	-
269	285	24,0	2,184	sig
269	277	21,5	2,155	sig
270	286	53,0	-0,141	-
270	278	37,0	-0,983	-
271	287	10,0	3,170	sig
271	279	26,0	1,785	-
272	288	41,0	0,986	-
272	280	35,5	1,064	-
273	289	48,5	1,765	-
273	281	46,0	1,894	-
274	290	47,5	-1,817	-
274	282	33,0	-2,569	sig

N_1	N_2	U	Z	E
275	291	21,5	2,563	sig
275	283	36,0	1,338	-
276	292	46,0	-0,953	-
276	284	25,0	-2,113	sig
309	293	21,0	-2,192	sig
309	301	39,0	-1,127	-
310	294	6,0	-3,326	sig
310	302	9,0	-3,239	sig
311	295	0,0	-3,874	sig
311	303	54,5	-0,035	-
312	296	0,0	-3,874	sig
312	304	51,5	-0,247	-
313	297	8,0	-3,180	sig
313	305	45,5	-0,340	-
314	298	5,0	-3,403	sig
314	306	16,5	-2,535	sig
315	299	0,0	-3,781	sig
315	307	26,0	-1,816	-
316	300	1,0	-3,705	sig
316	308	25,0	-1,891	-

N_1	N_2	U	Z	E
317	333	73,0	-1,938	-
317	325	16,0	-3,215	sig
318	334	78,0	-1,746	-
318	326	18,0	-3,100	sig
319	335	66,0	-0,346	-
319	327	25,0	-2,523	sig
320	336	43,0	-1,674	-
320	328	27,0	-2,401	sig
321	337	48,5	-1,333	-
321	329	35,0	-1,861	-
322	338	45,0	-1,536	-
322	330	13,0	-3,225	sig
323	339	69,5	0,144	-
323	331	19,0	-2,703	sig
324	340	49,0	-1,328	-
324	332	3,0	-3,758	sig
357	349	38,0	-1,874	-
357	341	58,0	-0,703	-
358	350	20,0	-2,928	sig
358	342	33,0	2,167	sig

N_1	N_2	U	Z	E
359	351	45,5	-0,957	-
359	343	33,5	-1,748	-
360	352	54,0	-0,396	-
360	344	30,0	1,979	-
361	353	49,0	-0,076	-
361	345	5,0	-3,404	sig
362	354	40,0	-0,756	-
362	346	35,0	-1,134	-
363	355	27,0	1,739	-
363	347	46,5	-0,265	-
364	356	30,0	1,512	-
364	348	37,0	0,983	-
365	381	9,0	-3,815	sig
365	373	2,0	-4,051	sig
366	382	16,0	-3,453	sig
366	374	5,5	-3,858	sig
367	383	5,0	-3,807	sig
367	375	0,0	-4,100	sig
368	384	25,0	-2,636	sig
368	376	13,0	-3,339	sig

N_1	N_2	U	Z	E
369	385	4,0	-3,819	sig
369	377	0,0	-3,957	sig
370	386	26,0	-2,463	sig
370	378	6,0	-3,561	sig
371	387	5,0	-3,759	sig
371	379	10,0	-3,297	sig
372	388	9,0	-3,509	sig
372	380	3,0	-3,758	sig
397	405	27,5	1,937	-
397	389	18,5	2,924	sig
398	406	40,0	1,056	-
398	390	33,5	2,001	-
399	407	5,5	3,615	sig
399	391	27,0	1,973	-
400	408	7,5	3,481	sig
400	392	11,5	3,065	sig
401	409	4,5	3,441	sig
401	393	30,0	1,225	-
402	410	0,0	3,780	sig
402	394	10,0	2,858	sig

N_1	N_2	U	Z	E
403	411	14,0	-2,723	sig
403	395	5,0	3,403	sig
404	412	28,5	1,626	-
404	396	13,5	2,760	sig
429	413	0,0	-3,888	sig
429	421	9,0	-3,240	sig
430	414	0,0	-3,874	sig
430	422	18,0	-2,607	sig
431	415	1,0	-4,040	sig
431	423	17,0	-3,103	sig
432	416	1,0	-4,041	sig
432	424	39,0	-1,816	-
433	417	0,0	-4,065	sig
433	425	27,5	-2,145	sig
434	418	4,0	-3,817	sig
434	426	23,0	2,440	sig
435	419	6,0	-3,695	sig
435	427	6,0	-3,564	sig
436	420	26,0	-2,463	sig
436	428	6,0	-3,563	sig

N_1	N_2	U	Z	E
453	437	44,5	-0,740	-
453	445	5,0	3,644	sig
454	438	48,5	-0,458	-
454	446	3,0	3,776	sig
455	439	0,0	-3,873	sig
455	447	21,0	-2,395	sig
456	440	0,0	-3,874	sig
456	448	35,5	-1,374	-
457	441	7,0	-3,380	sig
457	449	17,0	2,676	sig
458	442	4,5	-3,557	sig
458	450	19,5	2,501	sig
459	443	17,5	-2,804	sig
459	451	4,5	-3,662	sig
460	444	0,0	-3,959	sig
460	452	0,0	-3,959	sig

Tabelle 7: Berührschwelle und Druckschwelle unter dem Einfluß der Belastung zweier benachbarter Zähne mit je 100 mN, 200 mN, 500 mN und 1000 mN. Mittelwerte und Standardabweichungen.
(N: Nummer der Meßreihe, P: Proband, gZ: gemessener Zahn, bZ_1, bZ_2: die zwei belasteten Zähne, B: Belastung in mN, B/D: Berühr- oder Druckschwelle, M: Mittelwert in mN, S: Standardabweichung in mN).

N	P	gZ	bZ_1	bZ_2	B	B/D	M	S
509	5	11	12	21	100	B	16,20	4,42
510					100	D	44,41	11,58
511					200	B	24,00	7,31
512					200	D	48,87	8,80
513					500	B	25,74	8,46
514					500	D	60,14	4,11
515					1000	B	34,01	8,25
516					1000	D	76,49	5,71
517		11	21	22	100	B	22,25	11,51
518					100	D	49,77	17,53
519					200	B	18,76	6,56
520					200	D	39,94	12,06
521					500	B	28,52	4,19
522					500	D	65,03	11,94
523					1000	B	43,97	8,24
524					1000	D	72,30	6,45
525		12	11	21	100	B	21,15	5,40
526					100	D	46,01	6,30

N	P	gZ	bZ_1	bZ_2	B	B/D	M	S
527	5	12	11	21	200	B	35,97	11,07
528					200	D	67,41	10,51
529					500	B	38,43	7,09
530					500	D	68,21	6,56
531					1000	B	46,29	6,54
532					1000	D	88,11	6,65
533		21	22	11	100	B	12,77	3,80
534					100	D	31,73	3,59
535					200	B	16,80	6,54
536					200	D	40,11	4,80
537					500	B	26,21	12,05
538					500	D	58,23	13,87
539					1000	B	44,39	14,31
540					1000	D	96,90	8,53
541		21	11	12	100	B	21,38	6,94
542					100	D	41,37	7,35
543					200	B	29,57	13,82
544					200	D	56,72	11,60
545					500	B	26,76	6,64
546					500	D	62,57	5,04
547					1000	B	47,46	11,23
548					1000	D	94,38	6,75
549		22	21	11	100	B	22,32	5,48
550					100	D	47,61	6,36
551					200	B	28,10	9,97

N	P	gZ	bz_1	bz_2	B	B/D	M	S
552	5	22	21	11	200	D	59,72	12,73
553					500	B	26,48	10,29
554					500	D	59,33	8,96
555					1000	B	31,91	6,65
556					1000	D	60,38	8,61
557	6	11	12	21	100	B	65,94	23,65
558					100	D	99,90	24,82
559					200	B	71,91	22,90
560					200	D	113,88	18,49
561					500	B	75,54	10,98
562					500	D	120,18	15,24
563					1000	B	69,66	11,74
564					1000	D	119,04	16,50
565		11	21	22	100	B	48,86	7,48
566					100	D	84,10	9,00
567					200	B	47,13	13,70
568					200	D	85,17	19,61
569					500	B	55,20	13,98
570					500	D	98,22	19,62
571					1000	B	48,69	9,58
572					1000	D	80,13	8,92
573		12	11	21	100	B	42,21	8,61
574					100	D	78,30	6,32
575					200	B	56,13	11,69
576					200	D	100,41	17,10

N	P	gZ	bZ_1	bZ_2	B	B/D	M	S
577	6	12	11	21	500	B	52,08	10,68
578					500	D	101,97	21,11
579					1000	B	66,15	20,09
580					1000	D	108,03	15,23
581		21	22	11	100	B	49,35	11,73
582					100	D	97,17	16,97
583					200	B	31,92	5,88
584					200	D	78,63	12,23
585					500	B	37,65	13,34
586					500	D	67,53	16,48
587					1000	B	45,66	13,01
588					1000	D	84,21	12,94
589		21	11	12	100	B	54,28	13,60
590					100	D	99,20	15,20
591					200	B	55,62	17,05
592					200	D	100,53	17,16
593					500	B	39,99	16,66
594					500	D	89,49	17,04
595					1000	B	50,88	12,90
596					1000	D	103,80	20,29
597		22	21	11	100	B	57,18	15,11
598					100	D	111,06	12,14
599					200	B	55,56	12,62
600					200	D	102,90	16,40
601					500	B	70,83	11,37

N	P	gZ	bZ_1	bZ_2	B	B/D	M	S
602	6	22	21	11	500	D	118,41	12,38
603					1000	B	53,76	8,75
604					1000	D	115,44	21,18
605	7	11	12	21	100	B	37,29	9,15
606					100	D	59,04	10,62
607					200	B	57,72	11,76
608					200	D	76,35	11,39
609					500	B	71,16	11,21
610					500	D	92,22	11,24
611					1000	B	73,65	10,07
612					1000	D	97,56	9,28
613		11	21	22	100	B	39,99	6,11
614					100	D	68,13	11,52
615					200	B	49,53	10,35
616					200	D	75,57	10,74
617					500	B	64,71	9,61
618					500	D	101,49	7,54
619					1000	B	83,13	5,44
620					1000	D	118,11	9,11
621		12	11	21	100	B	45,78	5,29
622					100	D	74,56	3,94
623					200	B	45,99	7,67
624					200	D	68,88	8,06
625					500	B	58,08	10,73
626					500	D	85,95	9,27

N	P	gZ	bZ_1	BZ_2	B	B/D	M	S
627	7	12	11	21	1000	B	66,99	4,82
628					1000	D	106,28	7,37
629		21	22	11	100	B	37,47	5,35
630					100	D	56,91	6,47
631					200	B	40,20	3,59
632					200	D	68,58	5,78
633					500	B	50,70	8,10
634					500	D	76,45	10,91
635					1000	B	83,19	7,06
636					1000	D	108,96	5,93
637		21	11	12	100	B	26,20	4,59
638					100	D	45,11	6,20
639					200	B	36,82	4,48
640					200	D	59,02	6,69
641					500	B	62,89	17,21
642					500	D	96,22	20,62
643					1000	B	69,75	9,12
644					1000	D	94,92	7,93
645		22	21	11	100	B	58,96	4,32
646					100	D	89,10	3,09
647					200	B	38,73	5,01
648					200	D	53,70	5,91
649					500	B	53,07	6,38
650					500	D	75,45	10,44
651					1000	B	67,86	5,39
652					1000	D	96,84	8,08

Tabelle 8: Berührschwelle und Druckschwelle unter dem Einfluß der Belastung zweier Nachbarzähne. Auswertung mit dem U-Test von Mann und Whitney. (N_1, N_2: Nummern der verglichenen Meßreihen - siehe Tabellen 2 und 7 -, U: U-Wert, Z: Z-Wert, E: Ergebnis des durchgeführten Vergleichs, sig.: signifikanter Unterschied, -: kein signifikanter Unterschied).

N_1	N_2	U	Z	E
149	509	73,0	-4,302	sig
509	511	23,0	-2,256	sig
511	513	47,0	-0,227	-
513	515	27,0	-1,972	-
150	510	33,0	-4,853	sig
510	512	40,0	-1,056	-
512	514	9,0	-3,102	sig
514	516	1,0	-3,708	sig
149	517	47,0	-4,408	sig
517	519	49,0	0,423	-
519	521	12,0	-3,029	sig
521	523	8,0	-3,176	sig
150	518	29,0	-4,670	sig
518	520	36,0	1,339	-
520	522	7,0	-3,381	sig
522	524	28,0	-1,664	-

N_1	N_2	U	Z	E
151	525	20,0	-4,412	sig
525	527	5,5	-3,366	sig
527	529	37,0	-0,983	-
529	531	19,5	-2,306	sig
152	526	21,0	-4,389	sig
526	528	3,0	-3,553	sig
528	530	43,5	-0,492	-
530	532	2,0	-3,628	sig
153	533	85,5	-3,340	sig
533	535	31,5	-1,400	-
535	537	24,0	-1,968	-
537	539	14,0	-2,721	sig
154	534	15,0	-4,690	sig
534	536	8,5	-3,138	sig
536	538	8,0	-3,175	sig
538	540	0,0	-3,780	sig
153	541	7,0	-4,843	sig
541	543	34,5	-1,172	-
543	545	48,0	-0,151	-
545	547	4,0	-3,477	sig
154	542	4,0	-4,900	sig
542	544	13,0	-2,797	sig
544	546	37,0	-0,983	-
546	548	0,0	-3,780	sig

N_1	N_2	U	Z	E
155	549	4,0	-4,964	sig
549	551	34,0	-1,479	-
551	553	46,5	0,265	-
553	555	31,0	-1,436	-
156	550	0,0	-4,864	sig
550	552	21,5	-2,159	sig
552	554	39,0	-0,832	-
554	556	42,0	-0,605	-
157	557	0,0	-4,706	sig
557	559	43,0	-0,529	-
559	561	44,0	-0,454	-
561	563	38,5	0,870	-
158	558	0,0	-4,706	sig
558	560	31,5	-1,400	-
560	562	42,5	-0,567	-
562	564	48,0	0,151	-
157	565	0,0	-4,878	sig
565	567	46,0	0,952	-
567	569	32,0	-1,620	-
569	571	36,0	1,059	-
158	566	0,0	-4,878	sig
566	568	60,0	-0,033	-
568	570	33,0	-1,549	-
570	572	18,5	2,382	sig

N_1	N_2	U	Z	E
159	573	3,0	-4,637	sig
573	575	18,0	-2,421	sig
575	577	42,0	0,605	-
577	579	31,5	-1,400	-
160	574	1,0	-4,695	sig
574	576	4,5	-3,441	sig
576	578	47,0	-0,227	-
578	580	37,0	-0,983	-
161	581	0,0	-4,746	sig
581	583	8,5	3,139	sig
583	585	37,0	-0,984	-
585	587	32,0	-1,361	-
162	582	0,0	-4,744	sig
582	584	19,0	2,344	sig
584	586	27,0	1,740	-
586	588	18,0	-2,420	sig
161	589	0,0	-5,084	sig
589	591	58,5	0,099	-
591	593	23,5	2,004	-
593	595	29,0	-1,587	-
162	590	0,0	-5,082	sig
590	592	54,0	-0,396	-
592	594	32,0	1,361	-
594	596	29,0	-1,587	-

N_1	N_2	U	Z	E
163	597	3,0	-4,615	sig
597	599	47,5	0,189	-
599	601	17,0	-2,496	sig
601	603	9,0	3,099	sig
164	598	0,0	-4,706	sig
598	600	34,5	1,173	-
600	602	21,5	-2,155	sig
602	604	44,5	0,416	-
165	605	0,0	-4,993	sig
605	607	8,5	-3,139	sig
607	609	19,5	-2,307	sig
609	611	45,5	-0,340	-
166	606	0,0	-4,993	sig
606	608	13,0	-2,797	sig
608	610	14,0	-2,721	sig
610	612	35,5	-1,097	-
165	613	0,0	-4,993	sig
613	615	18,5	-2,383	sig
615	617	14,5	-2,686	sig
617	619	3,0	-3,554	sig
166	614	0,0	-4,993	sig
614	616	31,5	-1,400	-
616	618	0,5	-3,743	sig
618	620	5,0	-3,404	sig

N_1	N_2	U	Z	E
167	621	0,0	-5,179	sig
621	623	55,0	0,000	-
623	625	18,5	-2,382	sig
625	627	26,0	-1,816	-
168	622	0,0	-5,178	sig
622	624	30,0	1,760	-
624	626	9,0	-3,099	sig
626	628	3,0	-3,553	sig
169	629	0,0	-4,985	sig
629	631	25,0	-1,896	-
631	633	6,0	-3,454	sig
633	635	0,0	-3,874	sig
170	630	96,0	-3,179	sig
630	632	7,5	-3,215	sig
632	634	31,0	-1,691	-
634	636	0,0	-3,873	sig
169	637	5,0	-5,099	sig
637	639	3,0	-3,663	sig
639	641	3,0	-3,663	sig
641	643	40,5	-1,022	-
170	638	110,0	-3,230	sig
638	640	4,0	-3,591	sig
640	642	1,0	-3,803	sig
642	644	54,5	0,035	-

N_1	N_2	U	Z	E
171	645	0,0	-4,968	sig
645	647	0,0	3,780	sig
647	649	2,0	-3,630	sig
649	651	3,0	-3,556	sig
172	646	0,0	-4,976	sig
646	648	0,0	3,780	sig
648	650	3,0	-3,553	sig
650	652	4,0	-3,479	sig

Tabelle 9: Berührschwelle und Druckschwelle unter dem Einfluß der Belastung eines Nachbarzahnes mit 10 mN, 20 mN und 100 mN. Mittelwerte und Standardabweichungen. (N: Nummer der Meßreihe, P: Proband, gZ: gemessener Zahn, bZ: belasteter Zahn, B: Belastung in mN, B/D: Berühr- oder Druckschwelle, M: Mittelwert in mN, S: Standardabweichung in mN).

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
653	2	11	12	10	B	26,51	5,49
654				10	D	47,00	5,49
655				20	B	31,70	5,06
656				20	D	48,64	4,53
657				100	B	44,17	5,02
658				100	D	67,80	5,35
659		11	21	10	B	32,41	6,75
660				10	D	63,60	6,72
661				20	B	44,11	6,26
662				20	D	63,69	15,43
663				100	B	50,80	7,23
664				100	D	69,69	6,36
665	3	11	12	10	B	21,46	3,71
666				10	D	45,36	5,86
667				20	B	23,93	6,20
668				20	D	51,28	6,16
669				100	B	26,85	4,70
670				100	D	59,39	7,72
671		11	21	10	B	26,14	17,86
672				10	D	44,20	4,67

N	P	gZ	bZ	B	B/D	M	S
673	3	11	21	20	B	26,62	7,25
674				20	D	49,22	5,18
675				100	B	28,62	6,75
676				100	D	64,73	5,42
677	5	11	12	10	B	16,86	3,28
678				10	D	41,16	8,22
679				20	B	19,15	4,56
680				20	D	46,20	5,47
681				100	B	23,32	5,90
682				100	D	51,29	4,37
683		11	21	10	B	15,66	3,67
684				10	D	38,46	3,60
685				20	B	17,66	5,63
686				20	D	47,46	7,54
687				100	B	22,28	5,64
688				100	D	55,58	6,82

Tabelle 10: Berührschwelle und Druckschwelle unter dem Einfluß der Belastung eines Nachbarzahnes mit 10 mN, 20 mN und 100 mN.
Auswertung mit dem U-Test von Mann und Whitney. (N_1, N_2: Nummern der verglichenen Meßreihen - siehe Tabellen 1, 2 und 9 -, U: U-Wert, Z: Z-Wert, E: Ergebnis des durchgeführten Vergleichs, sig.: signifikanter Unterschied, -: kein signifikanter Unterschied).

N_1	N_2	U	Z	E
11	653	7,0	-3,980	sig
653	655	21,5	-2,155	sig
655	657	1,0	-3,145	sig
12	654	9,0	-3,884	sig
654	656	43,5	-0,492	-
656	658	1,0	-3,145	sig
13	659	1,0	-3,704	sig
659	661	9,0	-3,099	sig
661	663	24,0	-1,965	-
14	660	4,0	-3,479	sig
660	662	36,0	-1,058	-
662	664	40,0	-0,756	-
25	665	7,0	-3,608	sig
665	667	41,0	-0,646	-
667	669	46,0	-0,952	-
26	666	1,0	-3,965	sig
666	668	20,0	-2,241	sig
668	670	25,5	-2,299	sig

N_1	N_2	U	Z	E
25	671	14,0	-3,384	sig
671	673	36,5	-1,303	-
673	675	48,5	-0,458	-
26	672	4,0	-3,938	sig
672	674	26,0	-2,045	sig
674	676	2,0	-3,733	sig
149	677	55,0	-4,550	sig
677	679	47,5	-0,854	-
679	681	26,5	-2,008	-
150	678	41,0	-4,743	sig
678	680	33,0	-1,806	-
680	682	25,5	-2,079	sig
149	683	83,0	-4,164	sig
683	685	42,0	-0,916	-
685	687	28,0	-1,663	-
150	684	29,5	-4,901	sig
684	686	14,0	-2,888	sig
686	688	21,5	-2,361	sig

X. LITERATURVERZEICHNIS

1. Anderson, D. J.: Periodontal sensory mechanisms. In: Melcher, A. H., and Bowen, W. H. (Eds.): Biology of the periodontium. Academic Press, London, 1969, pp. 345 - 361.

2. Anderson, D. J., Hannam, A. G., and Matthews, B.: Sensory mechanisms in mammalian teeth and their supporting structures. Physiol. Rev. 50 (1970), 171 - 195.

3. Anderson, D. J., and Linden, R. W. A.: Sympathetic modulation of intraoral mechanoreceptor activity. J. Dent. Res. 56 (1977) D 125 (Abst.)

4. Anderson, K. V., and Pearl, G. S.: Transmedian innervation of canine tooth pulp in cat. Exp. Neurol. 44 (1974), 35 - 40.

5. Aström, K. E.: On the central course of afferent fibers in the trigeminal, facial, glossopharyngeal, and vagal nerves and their nuclei in the mouse. Acta Physiol. Scand. 29, Suppl. 106 (1953), 209 - 320.

6. Barlow, H. B.: Possible principles underlying the transformations of sensory messages. In: Rosenblith, W. A. (Ed.): Sensory communication. The M.I.T. Press, Massachusetts Institute of Technology, and John Wiley & Sons, Inc., New York - London, 1961, pp. 217 - 234.

7. Beaudreau, D. E., and Jerge, C. R.: Somatotopic representation in the Gasserian ganglion of tactile peripheral fields in the cat. Arch. Oral. Biol. 13 (1968), 247 - 256.

8. Bekesy, G. von: Physiologie der Sinneshemmung, "Das wissenschaftliche Taschenbuch", W. Goldmann Verlag, München, 1970.

9. Berkelbach van der Sprenkel, H.: Microscopial investigation of the innervation of the tooth and its surroundings. J. Anat. 70 (1936), 233 - 241.

10. Bernick, S., and Levy, B. M.: Studies on the biology of the periodontium of marmosets. IV. Innervation of the periodontal ligament. J. Dent. Res. 47 (1968), 1158 - 1165.

11. Bonaguro, J. G., Dusza, G. R., and Bowman, D. C.: Ability of human subjects to discriminate forces applied to certain teeth. J. Dent. Res. 48 (1969), 236 - 241.

12. Bowman, D. C., and Nakfoor, P. R.: Evaluation of the human subjects ability to differentiate intensity of forces applied to the maxillary central incisors. J. Dent. Res. 47 (1968), 252 - 259.

13. Byers, M. R., and Holland, G. R.: Trigeminal nerve endings in gingiva, junctional epithelium, and periodontal ligament of rat molars as demonstrated by autoradiography. Anat. Rec. 188 (1977), 509 - 524.

14. Catton, W. T., and Petoe, N.: A visco-elastic theory of mechanoreceptor adaptation. J. Physiol. 187 (1967), 35 - 49.

15. Darian-Smith, I.: Neural mechanisms of facial sensation. Int. Rev. Neurobiol. 9 (1966), 301 - 395.

16. Darian-Smith, I.: The trigeminal system. In: Iggo, A. (Ed.), Handbook of sensory physiology, Vol. 2, Somatosensory system. Springer-Verlag, Berlin, 1973, pp. 271 - 314.

17. Dependorf, T.: Nervenverteilung in der Zahnwurzelhaut des Menschen. Dtsch. Mschr. Zahnheilk. 31 (1913), 853 - 864.

18. Dubner, R., Sessle, B. J., and Storey, A. T.: The neural basis of oral und facial function. Plenum Press, New York and London, 1978.

19. Edel, A., and Wills, D. J.: A method for studying the effects of reduced alveolar support on the sensibility to axial forces on the incisor teeth in humans. J. Clin. Period. 2 (1975), 218 - 225.

20. Eisenmann, J., Fromm, G., Landgren, S., and Novin, D.: The ascending projections of trigeminal neurons in the cat, investigated by antidromic stimulation. Acta Physiol. Scand. 60 (1964), 337 - 350.

21. Eisenmann, J., Landgren, S., and Novin, D.: Functional organization in the main sensory trigeminal nucleus and in the rostral subdivision of the nucleus of the spinal trigeminal tract in the cat. Acta Physiol. Scand. 59 (1963), 3 - 44.

22. Feneis, H.: Gefüge und Funktion des normalen Zahnfleischbindegewebes. Dtsch. zahnärztl. Z. 7 (1952), 467 - 476.

23. Fröhlich, E., und Körber, E.: Die prothetische Versorgung des Lückengebisses. 2. Auflage. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1977.

24. Gobel, S., and Binck, J. M.: Degenerative changes in primary trigeminal axons and in neurons in nucleus caudalis following tooth pulp extirpations in the cat. Brain Res. 132 (1977), 347 - 354.

25. Goldberg, L. J.: Masseter muscle excitation induced by stimulation of periodontal and gingival receptors in man. Brain Res. 32 (1971), 369 - 381.

26. Green, D. M., and Swets, J. A.: Signal detection theory and psychophysics. John Wiley & Sons, Inc., New York - London - Sydney, 1966, pp. 117 - 148.

27. Griffin, C. J., and Harris, R.: Innervation of the human periodontium. I. Classification of periodontal receptors. Aust. Dent. J. 19 (1974), 51 - 56.

28. Griffin, C. J., and Harris, R.: Innervation of the human periodontium. III. Fine structure of compound receptors. Aust. Dent. J. 19 (1974), 255 - 260.

29. Griffin, C. J., and Spain, H.: Organization and vasculature of human periodontal ligament mechanoreceptors. Arch. Oral Biol. 17 (1972), 913 - 921.

30. Haider, M., Spong, P., and Lindsley, D. B.: Attention, vigilance, and cortical evoked-potentials in humans. Science 145 (1964), 180 - 182.

31. Hannam. A. G.: The response of periodontal mechanoreceptors in the dog to controlled loading of the teeth. Arch. Oral Biol. 14 (1969), 781 - 791.

32. Hannam, A. G.: Spontaneous activity in dental mechanosensitive units in the dog. Arch. Oral Biol. 14 (1969), 793 - 801.

33. Hannam, A. G.: Receptor fields of periodontal mechanosensitive units in the dog. Arch. Oral Biol. 15 (1970), 971 - 978.

34. Hannam. A. G.: Periodontal mechanoreceptors. In: Anderson, D. J., and Matthews, B. (Eds.): Mastication. John Wright and Sons Ltd., Bristol, 1976, pp. 42 - 49.

35. Hannam, A. G., and Farnsworth, T. J.: Information transmission in trigeminal mechanosensitive afferents from teeth in the cat. Arch. Oral Biol. 22 (1977), 181 - 186.

36. Harris, R.: Innervation of the human periodontium. Monogr. Oral Sci. 4 (1975), 27 - 44.

37. Harris, R., and Griffin, C. J.: Innervation of the human periodontium. II. Fine structure of simple mechanoreceptors. Aust. Dent. J. 19 (1974), 174 - 181.

38. Harris, R., and Griffin, C. J.: Innervation of the human periodontium. IV. Fine structure of the complex mechanoreceptors and free nerve endings. Aust. Dent. J. 19 (1974), 326 - 331.

39. Hassler, R., und Muhs-Clement, K.: Architektonischer Aufbau des sensomotorischen und parietalen Cortex der Katze. J. Hirnforsch. 6 (1964), 377 - 420.

40. Herholz, T.: Die taktile Sensibilität bei marktoten und wurzelspitzenamputierten oberen Frontzähnen. Med. Diss., Tübingen, 1978.

41. Hilton, P. B.: The effect of repeated stimulation on the response from slowly adapting periodontal mechanoreceptors. In: Emmelin, N., and Zotterman, Y. (Eds.): Oral physiology. Pergamon Press, Oxford, 1971, pp. 217 - 222.

42. Jenkins, G. N.: The physiology and biochemistry of the mouth. Fourth edition. Blackwell Scientific Publications, Oxford - London - Edinburgh - Melbourne, 1978, pp. 558 - 560.

43. Jenz, K.-P.: Die Berührschwelle menschlicher Zähne. Eine neurophysiologische Untersuchung zur Funktion parodontaler Pressosensoren. Med. Diss., Tübingen, 1976.

44. Jerge, C. R.: Organization and function of the trigeminal mesencephalic nucleus. J. Neurophysiol. 26 (1963), 379 - 392.

45. Jerge, C. R.: The function of the nucleus supratrigeminalis. J. Neurophysiol. 26 (1963), 393 - 402.

46. Johansson, R. S., and Olsson, K. A.: Microelectrode recordings from human oral mechanoreceptors. Brain Res. 118 (1976), 307 - 311.

47. Kahle, W., Leonhardt, H., und Platzer, W.: Taschenatlas der Anatomie. Band 3, Nervensystem und Sinnesorgane. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, Deutscher Taschenbuchverlag, 1976.

48. Kawamura, Y.: Neurophysiological background of occlusion. Periodontics 5 (1967), 175 - 183.

49. Kawamura, Y., and Nishiyama, T.: Projection of dental afferent impulses to the trigeminal nuclei of the cat. Jap. J. Physiol. 16 (1966), 584 - 597.

50. Keidel, W. D. (Hrsg.): Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie. 5. Auflage. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1979.

51. Körber, K.: Zahnärztliche Prothetik. Band I. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1975.

52. Lewinsky, W., and Stewart, D.: The innervation of the periodontal membrane. J. Anat. 71 (1937), 98 - 102.

53. Lewinsky, W., and Stewart, D.: The innervation of the periodontal membrane of the cat, with some observations on the function of the end-organs found in that structure. J. Anat. 71 (1937), 232 - 235.

54. Licklider, J. C. R.: On psychophysical models. In: Rosenblith, W. A. (Ed.): Sensory communication. The M.I.T. Press, Massachusetts Institute of Technology, and John Wiley & Sons, Inc., New York - London, 1961, pp. 49 - 72.

55. Linden, R. W. A.: Touch thresholds of vital and non-vital human teeth. Exp. Neurol. 48 (1975), 387 - 390.

56. Linden, R. W. A.: A new group of intraoral mechanoreceptors. J. Dent. Res. 55 (1976), D 107 (Abst.).

57. Linden, R. W. A.: Properties of intraoral mechanoreceptors represented in the mesencephalic nucleus of the fifth nerve in the cat. J. Physiol. 279 (1978), 395 - 408.

58. Loewenstein, W. R., and Rathkamp, R.: A study on the pressoreceptive sensibility of the tooth. J. Dent. Res. 34 (1955), 287 - 294.

59. Lund, J. P., and Sessle, B. J.: Oral-facial and jaw muscle afferent projections to neurons in cat frontal cortex. Exp. Neurol. 45 (1974), 314 - 331.

60. Mountcastle, V. B.: Some functional properties of the somatic afferent system. In: Rosenblith, W. A. (Ed.): Sensory communication. The M. I. T. Press, Massachusetts Institute of Technology, and John Wiley & Sons, Inc., New York - London, 1961, pp. 403 - 436.

61. Mühlbradt, L.: Grundzüge der Neurophysiologie des Kauorgans. Dtsch. zahnärztl. Z. 31 (1976), 282 - 290.

62. Permar, D.: Oral embryology and microscopic anatomy. Fourth edition. Lea and Febiger, Philadelphia, 1967, pp. 90 - 97.

63. Pimenidis, M. Z., and Hinds, J. W.: An autoradiographic study of the sensory innervation of teeth. II. Dental pulp and periodontium. J. Dent. Res. 56 (1977), 835 - 840.

64. Pollack, I.: Selected developments in psychophysics, with implications for sensory organization. In: Rosenblith, W. A. (Ed.): Sensory communication. The M. I. T. Press, Massachusetts Institute of Technology, and John Wiley & Sons, Inc., New York - London, 1961, pp. 89 - 98.

65. Rohen, J. W.: Anatomie für Zahnmediziner. F. K. Schattauer Verlag, Stuttgart-New York, 1977.

66. Sachs, L. Angewandte Statistik. 4. Auflage. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1974.

67. Sakada, S., and Kamio, E.: Receptive fields and directional sensitivity of single sensory units innervating the periodontal ligaments of the cat mandibular teeth. Bull. Tokyo Dent. Coll. 12 (1971), 25 - 43.

68. Sauerwein, E.: Zahnerhaltungskunde. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1972.

69. Schulte, W.: Knirschen und Pressen im vollbezahnten Gebiß - zugleich ein Beitrag zur Therapie der parafunktionell bedingten Kiefergelenkserkrankungen und zur Messung der Kaumuskeltätigkeit. Dtsch. zahnärztl. Z. 21 (1966), 112 - 117.

70. Schulte, W.: Die Muskelentspannung zur Therapie der Arthropathien des Kiefergelenks - zugleich ein Beitrag zur Steuerung des muskulomandibulären Bewegungssystems. Dtsch. zahnärztl. Z. 22 (1967), 858 - 873.

71. Schumacher, G. - H., und Schmidt, H.: Anatomie und Biochemie der Zähne. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1972, pp. 460 - 461.

72. Scott, J. H., and Simons, N. B. B.: Introduction to dental anatomy. Seventh edition. Churchill Livingstone, Edinburgh and London, 1974, pp. 259 - 272.

73. Sessle, B. J., Dubner, R., Greenwood, L. F., and Lucier, G. E.: Descending influences of periaquaeductal gray matter and somatosensory cerebral cortex on neurons in trigeminal brain stem nuclei. Can. J. Physiol. Pharmacol. 54 (1976), 66 - 69.

74. Sicher, H.: Oral anatomy. Fourth edition. The C. V. Mosby Company, Saint Louis, 1965, pp. 374 - 385.

75. Simpson, H. E.: The innervation of the periodontal membrane as observed by the apoxestic technique. J. Periodont. 37 (1966), 374-376.

76. Skramlik, E. von: Die Zähne als Vermittler von Empfindungen. Dtsch. Stomat. 2 (1952), 326 - 335.

77. Starkie, C., and Stewart, D.: The intra-mandibular course of the inferior dental nerve. J. Anat. 65 (1931), 319 - 323.

78. Steenberghe, D. van, and Vries, J. H. de: Psychophysical threshold levels of periodontal mechanoreceptors in man. Arch. Oral Biol. 23 (1978), 1041 - 1049.

79. Stevens, S. S.: The psychophysics of sensory function. In: Rosenblith, W. A. (Ed.): Sensory communication. The M. I. T. Press, Massachusetts Institute of Technology, and John Wiley & Sons, Inc., New York - London, 1961, pp. 1 - 33.

80. Susi, F. R.: Sensory receptor morphology in the teeth and their supporting tissues. Dent. Clin. North Am. 22, No. 1 (Jan. 1978), 3 - 9.

81. Warwick, R., and Williams, P. L. (Eds.): Gray's anatomy. 35th edition, Longman, 1973, pp. 952 - 965.

82. Yamada, M., and Kumano, T.: Mobility and assessment of the tactile sensation of teeth. Int. Dent. J. 19 (1969), 295 - 296.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. W. Schulte für die Überlassung des Themas sowie Herrn Dipl.-Phys. D. Lukas und Herrn Dr. L. Mühlbradt für die freundliche Unterstützung recht herzlich danken.

LEBENSLAUF

Am 26. April 1954 wurde ich, Franz Ackermann, als Sohn des Postbeamten Alois Ackermann und dessen Ehefrau Hildegard Ackermann, geb. Denk, in Stuttgart geboren.

Ab 1961 besuchte ich die Grundschule in Stuttgart. 1965 wechselte ich auf das Wilhelms-Gymnasium in Stuttgart-Degerloch über, wo ich im Juni 1973 die Reifeprüfung ablegte.

Im Wintersemester 1973/74 nahm ich an der Eberhard-Karls-Universität in Tübingen das Studium der Zahnmedizin auf, das ich am 21. Juni 1979 mit der zahnärztlichen Prüfung abschloß.

Von April 1980 bis Juni 1981 leistete ich meinen Wehrdienst ab. Seit Juli 1981 bin ich als wissenschaftlicher Angestellter am Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Universität Tübingen tätig.